

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lea Mandić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Damir Godec

Student:

Lea Mandić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Lea Mandić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Lea Mandić** Mat. br.: 0035180480

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj konstrukcijskih značajki na mehanička svojstva 3D tiskane tvorevine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of Design Characteristics on Mechanical Properties of 3D Printed Part**

Opis zadatka:

Jedna od prednosti postupaka 3D tiskanja je mogućnost izrade tvorevina sa šupljikavom strukturom, pri čemu se uz uštedu na materijalu i smanjenju mase, nastoje očuvati mehanička svojstva 3D tiskane tvorevine. Na svojstva 3D tiskane tvorevine moguće je utjecati izborom materijala, parametrima 3D tiskanja, ali i konstrukcijskim značajkama tvorevine, kao što su udio i oblik ispune u unutrašnjosti 3D tiskane tvorevine, te broj čvrstih slojeva koji oblikuju vanjsku konturu tvorevine.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- detaljno opisati postupak niskobudžetnog 3D tiskanja temeljenog na taloženju rastaljenog materijala (engl. *Fused Deposition Modelling* – FDM)
- sistematizirati najvažnije parametre niskobudžetnog 3D tiskanja temeljenog na FDM postupku
- na referentnom geometrijskom obliku tvorevine, analizirati kako različiti oblici i gustoća ispune te brojevi vanjskih čvrstih slojeva utječu na mehanička svojstva 3D tiskane tvorevine i vrijeme njene izrade
- dobivene rezultate staviti u kontekst smanjenja mase 3D tiskane tvorevine u usporedbi s kompaktnom inačicom te procijeniti posljedice takvog smanjenja mase tvorevine.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Damir Godec

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA I OZNAKA	VII
SAŽETAK	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1. Postupci aditivne proizvodnje	2
2.1.1. Brza proizvodnja prototipova RP	3
2.1.2. Brza proizvodnja alata i kalupa RT	3
2.1.3. Brza (izravna) proizvodnja RM	4
2.2. Mogućnosti primjene postupaka aditivne proizvodnje.....	5
2.3. Načela aditivne proizvodnje	5
3. POSTUPAK TALOŽNOG OČVRŠĆIVANJA	8
3.1. FDM – postupak taložnog očvršćivanja	9
3.2. Prednosti i nedostaci FDM postupka.....	10
3.3. Materijali	12
3.3.1. Potporni materijali	15
3.3.2. Filament.....	15
3.4. Mogući problemi i rješenja tijekom izrade proizvoda FDM postupkom [12].....	17
4. PARAMETRI FDM POSTUPKA.....	28
4.1. Ispuna	28
4.1.1. Ispuna pune strukture	29
4.1.2. Ispuna mrežaste strukture	30

4.1.2.1. Pravocrtna ispuna	30
4.1.2.2. Linijska ispuna.....	31
4.1.2.3. Šesterokutna ispuna	31
4.1.2.4. Ostale ispune	32
4.1.2.5. Posebne ispune	33
4.2. Konture	34
4.2.1. Konstrukcija konture	34
4.2.2. Ispunjavanje konture	34
4.2.3. Broj kontura	34
4.3 Debljina sloja	35
4.4. Temperatura.....	35
4.5. Brzina i vrijeme ispisa	36
4.6. Broj vanjskih slojeva	36
4.7. Početni i završni slojevi tvorevine	37
4.8. Potporna struktura	37
4.9. Podloga	37
5. NISKOBUĐŽETNI PRINTER KLONER3D	39
6. PLANOVI POKUSA.....	41
6.1. Centralno – kompozitni plan pokusa	41
7. SAVOJNA ČVRSTOĆA.....	44
8. PREDPOKUS	46
9. POKUS.....	50
ZAKLJUČAK.....	57
POPIS LITERATURE.....	59
PRILOZI	61

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Područja primjene [1]	2
Slika 2.2. Prototipni proizvod (zupčanici) [3]	3
Slika 2.3. Prototipni kalupni umetak (žig za izradu reflektirajućeg svjetla) [4]	4
Slika 2.4. Slaganje 2D slojeva u 3D proizvod [1]	6
Slika 2.5. Osnovni koraci pravljenja proizvoda postupcima aditivne proizvodnje	7
Slika 3.1. Prvi FDM stroj [6]	8
Slika 3.2. Načelo postupka taložnog očvršćivanja (FDM) [8]	9
Slika 3.3. Karakteristika ponašanja σ - ϵ ABS-M30 materijala pri promjeni temperature [6] ...	13
Slika 3.4. Prikaz proizvoda od polikarbonata [6]	14
Slika 3.5. Izgled proizvoda dobivenim iz raznih vrsta polimera [6]	14
Slika 3.6. Filament [11]	15
Slika 3.7. Filament [12]	16
Slika 3.8. Stijenka filameta [12]	16
Slika 3.9. Bez ekstrudiranja materijala [12]	17
Slika 3.10. Filament odlijepljen od radne podloge [12]	18
Slika 3.11. Pogreška prvog sloja [12]	18
Slika 3.12. Nedovoljno ekstrudiranje materijala [12]	19
Slika 3.13. Previše ekstrudiranog materijala [12]	19
Slika 3.14. Rupe i praznine u gornjim slojevima [12]	19
Slika 3.15. Pojava niti [12]	20
Slika 3.16. Pregrijavanje proizvoda [12]	20
Slika 3.17. Pomicanje slojeva [12]	21
Slika 3.18. Raslojavanje [12]	21
Slika 3.19. Brušenje filameta [12]	21
Slika 3.20. Začepljen ekstruder [12]	22
Slika 3.21. Prestanak ekstrudiranja tijekom printanja [12]	22

Slika 3.22. Nedovoljna količina ekstrudirane ispune [12]	23
Slika 3.23. Ispupčenja [12]	23
Slika 3.24. Praznine između ispune i konture [12]	23
Slika 3.25. Savijanje slojeva [12]	24
Slika 3.26. Brazgotine na gornjoj površini [12]	24
Slika 3.27. Praznine u uglovima proizvoda [12]	24
Slika 3.28. Pojava linija na isprintanom proizvodu [12]	25
Slika 3.29. Pojava ispupčenja zbog vibracija [12]	25
Slika 3.30. Praznine u tankim stjenkama proizvoda [12]	26
Slika 3.31. Nekontinuirano ekstrudiranje [12]	26
Slika 3.32. Savijanje proizvoda [12]	26
Slika 3.33. Loša površina proizvoda iznad podupora [12]	27
Slika 3.34. Dimenzijska netočnost [12]	27
Slika 4.1. Prikaz postotka ispune na ispitnim epruvetama [12]	29
Slika 4.2. Orijentacija rasteznih ispitnih tijela u radnom prostoru [14]	29
Slika 4.3. Vrsta loma kod ispitivanja tijela u X, Y i Z smjeru [14]	30
Slika 4.4. Pravocrtna ispuna [15]	31
Slika 4.5. Ispuna linijama [15]	31
Slika 4.6. Šesterokutna ispuna [15]	32
Slika 4.7. a) koncentrična ispuna, b) ispuna u obliku Hilbertovih krivulja [16]	32
Slika 4.8. a) spiralni oktagram, b) ispuna u obliku Arhimedovih krivulja [16]	33
Slika 4.9. <i>Cat infill</i> [18]	33
Slika 4.10. <i>Shark infill</i> [18]	33
Slika 4.11. Utjecaj broja kontura na čvrstoću tvorevine [12]	35
Slika 4.12. Broj vanjskih slojeva [12]	37
Slika 5.1. KLONER3D 300H [21]	39
Slika 5.2. Sučelje KLONER3D printera	40

Slika 6.1. Centralno – kompozitni plan pokusa s tri faktora [24].....	42
Slika 7.1. Kidalica na kojoj se vršilo ispitivanje	44
Slika 7.2. Puknuće epruvete	44
Slika 8.1. Ispitna epruveta	46
Slika 8.3. Pomično mjerilo	46
Slika 8.3. Linijska, koncentrična i kružna ispuna.....	47
Slika 8.4. Dijagram savojno naprezanje/istezanje za predpokus.....	49
Slika 8.5. Prikaz ispitivanih epruveta	49
Slika 9.4. Graf ovisnosti funkcije poželjnosti (savojna čvrstoća) o konturi i ispuni.....	54
Slika 9.5. Graf ovisnosti funkcije poželjnosti (kompleksna funkcija) o ispuni i konturi pri kompleksnom optimiranju.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Specifikacije KLONER3D printera [21]	39
Tablica 5.2. Uneseni parametri printanja	40
Tablica 8.1. Parametri printanja za predpokus	48
Tablica 8.2. Parametri kidalice	48
Tablica 9.1. Vrijednosti zadanih parametara	50
Tablica 9.2. Izlazni podaci za provedbu pokusa	51
Tablica 9.3. Prikaz rješenja uz unesene kriterije za jednostavno optimiranje	54
Tablica 9.4. Prikaz rješenja uz unesene kriterije za jednostavno optimiranje	55

POPIS KRATICA I OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ABS		Akilonitril / butadien / stiren
PC		Polikarbonat
PLA		Polilaktička kiselina
PEEK		Polieter/eter/keton
PPSF		Polifenilen sulfon
RP		Brza proizvodnja prototipova (eng. Rapid Prototyping)
RT		Brza izrada alata (eng. Rapid Tooling)
RM		Brza proizvodnja (eng. Rapid Manufacturing)
AM		Aditivna proizvodnja (eng. Additive Manufacturing)
FDM		Taložno očvršćivanje (eng. Fused Deposition Modeling)
°C		Celzijev stupanj
\bar{X}		Aritmetička sredina
σ	N/mm ²	Naprezanje
ε	%	Istezanje
h	mm	Debljina
b	mm	Širina
l	mm	Duljina
m	g	Masa

SAŽETAK

Aditivne tehnologije počele su se razvijati kako bi se zadovoljilo tržište. Neki od najvažnijih zahtjeva današnjeg tržišta su povišenje kvalitete proizvoda uz istodobno sniženje troškova, vremena razvoja i proizvodnje. Uz aditivnu tehnologiju razvili su se niskobudžetni 3D printeri koji rade na principu taložnog očvršćivanja. U ovome radu objašnjen je postupak taložnog očvršćivanja. Navedeni su prednosti i nedostaci primjene, te mogući problemi i rješenja prilikom izrade proizvoda tim postupkom. Poznavanje parametara izrade temelj je za izradu kvalitetnog proizvoda. Težište ovoga rada bilo je na parametrima ispune i konture, jer su ti parametri obrađivani u eksperimentalnom dijelu.

Eksperimentalni dio rada sastojao se od izrade ispitnih tijela na KLONER3D printeru, a zatim je uslijedilo ispitivanje čvrstoće raznih kombinacija gustoće ispune i debljine konture. Kombinacije i broj stanja pokusa dobivene su centralno – kompozitnim planom pokusa pomoću programskog paketa DesignExpert.

ključne riječi: taložno očvršćivanje, parametri prerade, ispuna, kontura, savojna čvrstoća

SUMMARY

Additive technologies began to develop with a reason of feeding the market. The most important market claims nowadays are raising the products quality with reducing costs, development and manufacturing time simultaneously. With the development of additive technology, low-budget 3D printers that work on principle of fused deposition modeling also evolved. This thesis explains the method of fused deposition modeling (FDM). Advantages, disadvantages and possible problems in the product development using this application are mentioned, and solutions are provided. Knowing the production parameters is the basis for making a high quality product. This thesis focus is on infill and contour parameters, because these parameters were processed in experimental part.

The experimental thesis part consisted of making test pieces on the KLONER3D printer accompanied with a strength test of various combinations of infill density and contour thickness. Combinations and number of experiments were obtained by using a central - composite experiment plan of the DesignExpert program package.

key words: Fused deposition modeling, processing parameters, filling, contour, flexural strength

1. UVOD

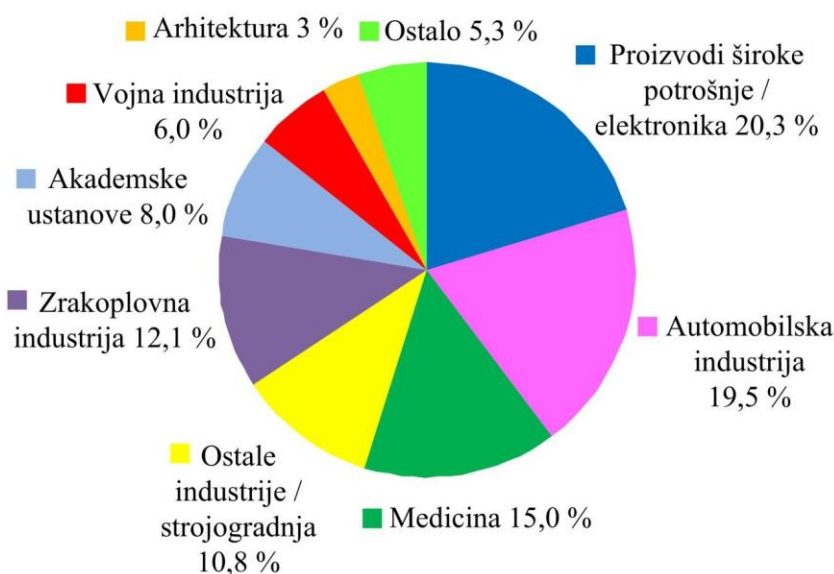
Aditivna tehnologija je slojevita izrada proizvoda koja se proizvodi izravno na opremi za aditivne postupke na osnovi 3D računalnog modela proizvoda. Na taj se način omogućuje proizvodnja geometrijski složenih oblika kakve nije moguće proizvesti pomoću klasičnih proizvodnih tehnologija. Primjena aditivne tehnologije omogućuje proizvodnju bez alata što je velika prednost u proizvodnji pojedinačnih i maloserijskih proizvoda.

Aditivne tehnologije razvile su se kako bi zadovoljile tržište za povišenjem kvalitete proizvoda uz istodobno sniženje troškova, vremena razvoja i proizvodnje. Tako je došlo do razvitka niskobudžetnih uređaja za aditivnu proizvodnju koji za rezultat daju širenje aditivne tehnologije i dostupnost zainteresiranim korisnicima.

Pri razvoju niskobudžetnih sustava najčešće je u primjeni FDM postupak, odnosno postupak taložnog očvršćivanja. To je postupak aditivne proizvodnje temeljen na ekstrudiranju koji za izradu proizvoda rabi najčešće rastaljeni, polimerni materijal.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Uporabom aditivne proizvodnje proizvod nastaje dodavanjem materijala sloj po sloj. Ne zahtijevaju razvoj i izradu alata i kalupa, a pružaju gotovo neograničene mogućnosti kada je riječ o kompleksnoj geometriji proizvoda. Zbog toga nije potrebna velikoserijska proizvodnja kojom bi se amortizirao trošak izrade alata i kalupa. Primjena aditivnih postupaka omogućuje miješanje materijala u velikom broju kombinacija. Na slici 2.1. prikazana su područja primjene aditivne proizvodnje.



Slika 2.1. Područja primjene [1]

2.1. Postupci aditivne proizvodnje

Postupke aditivne proizvodnje moguće je sistematizirati u tri velike skupine:

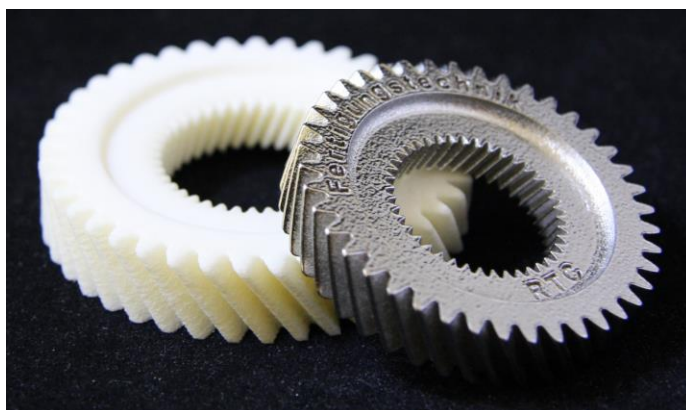
1. Postupci brze proizvodnje prototipova (eng. Rapid Prototyping – RP)
2. Postupci brze proizvodnje alata i kalupa (eng. Rapid Tooling – RT)
3. Postupci brze, odnosno izravne proizvodnje (eng. Rapid Manufacturing – RM)

Ti postupci omogućuju proizvodnju proizvoda vrlo kompliciranih oblika izravno iz računalnih podataka u vrlo kratkom vremenu s pomoću najčešće automatiziranih procesa. Riječ je o procesima u kojima se proizvod gradi slaganjem slojeva jedan na drugi. [2]

Aditivna proizvodnja alata i kalupa bitno se razlikuje od aditivne proizvodnje prototipova. Aditivna proizvodnja prototipova zahtijeva prevladavajuće znanje o samo jednom postupku, dok aditivna proizvodnja alata i kalupa zahtijeva, uz poznavanje RT postupka, dobro poznavanje injekcijskog prešanja te klasičnog postupka obrade odvajanjem čestica. Prednosti ta dva postupka su poboljšani razvoj i kvaliteta proizvoda, proizvodnja i položaj tvrtke na tržištu. [2]

2.1.1. Brza proizvodnja prototipova RP

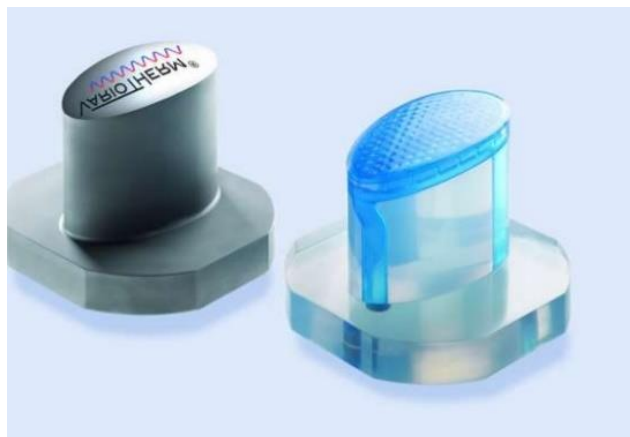
Postupci brze proizvodnje prototipova znače skupinu postupaka za proizvodnju modela i prototipova koji mogu oponašati oblik (geometriju), materijal i funkciju(e) budućih proizvoda. Pokusna proizvodnja prototipova predviđenim postupkom prerade daje potrebne informacije o ponašanju proizvoda, mogućnostima prerade, tolerancijama izmjera i oblika proizvoda. [2]



Slika 2.2. Prototipni proizvod (zupčanici) [3]

2.1.2. Brza proizvodnja alata i kalupa RT

Postupci brze proizvodnje alata i kalupa primjenjuju se za proizvodnju alata i kalupa ili njihovih najkompliciranijih dijelova za proizvodnju prototipnih ili probnih serija proizvoda uporabom istog procesa proizvodnje kojim će se proizvoditi konačni proizvod. Pri tome se rabi jedan ili više postupaka brze proizvodnje prototipova, a u čitavom se procesu mogu kombinirati i klasični postupci izrade alata i kalupa. [2]



Slika 2.3. Prototipni kalupni umetak (žig za izradu reflektirajućeg svjetla) [4]

Brza proizvodnja prototipnih kalupa podrazumijeva primjenu niza postupaka brze proizvodnje prototipova kojima se izrađuju čitavi privremeni alati i kalupi ili samo elementi koji oblikuju kalupne šupljine u kojima će se izraditi odgovarajući broj proizvoda. [2]

Moguća je sistematizacija prototipnih alata i kalupa prema trajnosti alata i kalupa, te načinu pravljenja alata i kalupa. S obzirom na namjenu moguće je odabrati vrstu prototipnih alata i kalupa, pa tako postoje privremeni kalupi koji omogućuju izradu samo nekoliko otpresaka prije nego što postanu neupotrebljivi. To su najčešće silikonski kalupi. Zatim prijelazni alati i kalupi, koji omogućuju izradu i nekoliko tisuća proizvoda, a osnovna im je namjena skraćanje vremena za lansiranje proizvodnje te uklanjanje grešaka koje nastaju pri razvoju i proizvodnji novog proizvoda. Posljednju skupinu čine trajni alati i kalupi za serijsku proizvodnju koji omogućuju izradu serije proizvoda jednake ili slične seriji koju omogućuje uporaba klasičnih alata i kalupa za serijsku proizvodnju. [2]

2.1.3. Brza (izravna) proizvodnja RM

Postupak brze proizvodnje podrazumijeva primjenu postupaka aditivne proizvodnje za proizvod koji će se primijeniti kao i proizvod načinjen u serijskog proizvodnji. Iako je ovaj segment aditivne proizvodnje još ograničen, zbog ograničenog broja raspoloživih materijala, trajno se razvijaju novi materijali koji će svakako pridonijeti uporabi aditivne (izravne) proizvodnje u više primjena. [2]

2.2. Mogućnosti primjene postupaka aditivne proizvodnje

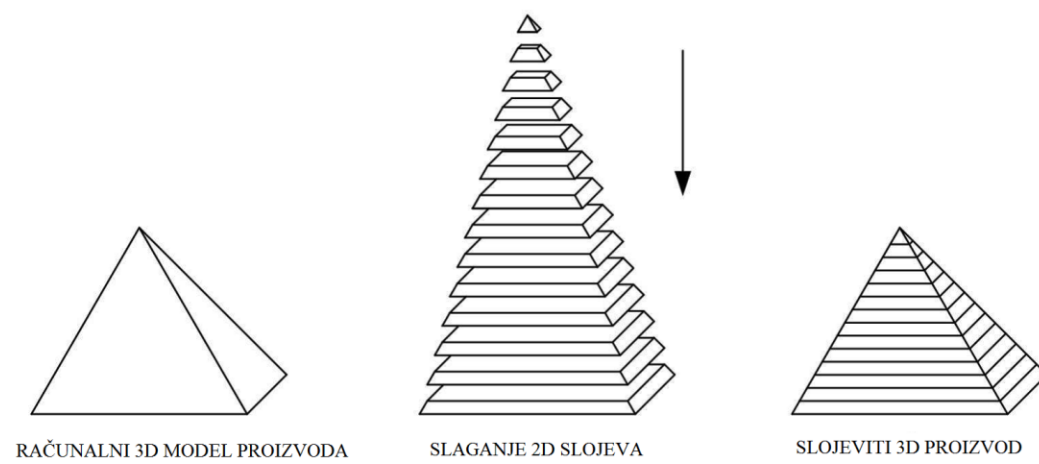
Područje primjene postupaka aditivne proizvodnje radi unapređenja poslovanja, osiguranja učinkovitosti i kvalitete te povišenja dobiti moguće je sažeti kao:

- proizvodnja konceptijskih modela
- vizualizacija dijelova proizvoda i čitavih sklopova
- ispitivanje funkcije proizvoda i mogućnosti uklapanja s ostalim elementima
- proizvodnja prototipova za promociju proizvoda i izradu kataloga
- proizvodnja prototipova za potrebe razvoja proizvodnih linija i ćelija
- proizvodnja prototipova za ispitivanje tržišta
- proizvodnja prototipova za razvoj odgovarajućeg pakovanja proizvoda
- proizvodnja pramodela za proizvodnju alata i kalupa
- izrada elektroda za obradu odvajanjem čestica
- izrada kompliciranih kalupnih šupljina za male serije proizvoda
- izrada metalnih kalupnih šupljina za veće serije proizvoda
- skraćenje isporuke prototipova za manje od pola vremena nego pri klasičnoj izradi
- skraćenje isporuke alata i kalupa za oko pola vremena nego pri klasičnoj izradi alata i kalupa

2.3. Načela aditivne proizvodnje

Postupcima aditivne, odnosno slojevite proizvodnje grade se vrlo komplicirani geometrijski 3D oblici proizvoda, načelno je riječ o 2,5D postupcima pri kojima se 2D slojevi slažu jedan na drugi i tako se dolazi do treće dimenzije proizvoda, što je i prikazano na slici 2.4.

Kao rezultat takvog načina gradnje dobivaju se trodimenzijski proizvodi s visokom točnošću u ravni X - Y , a točnost u smjeru osi Z ovisi o debljini slojeva. Što su slojevi tanji, veća je točnost proizvoda. [2]

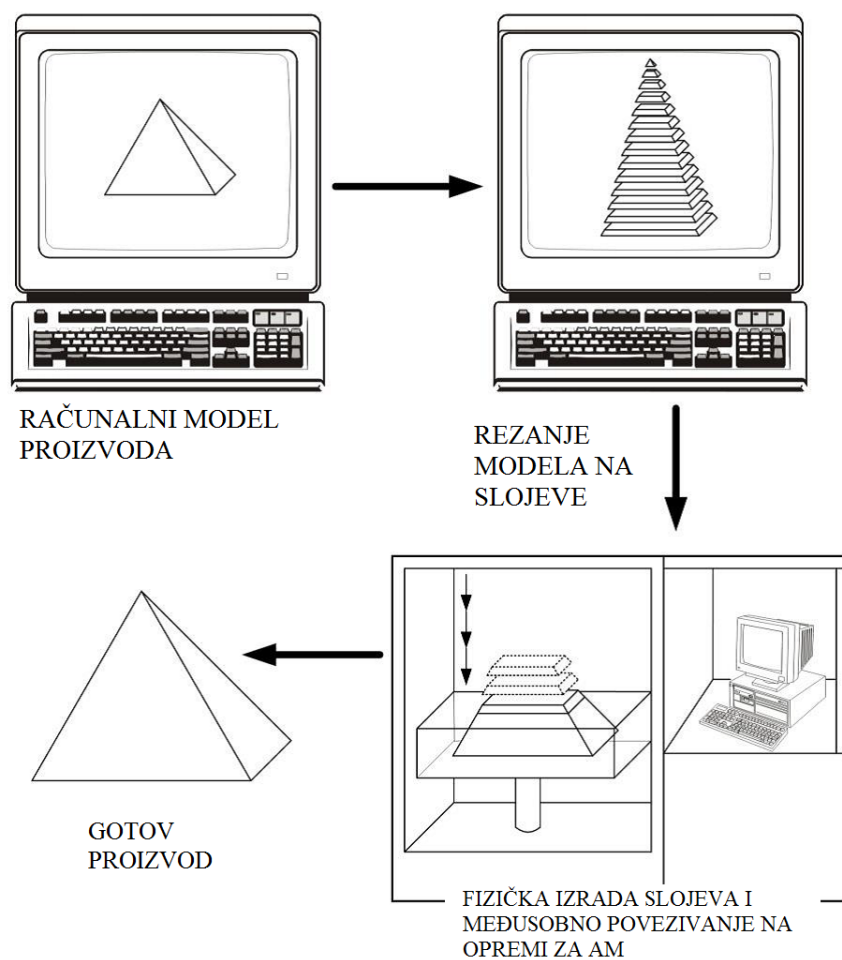


Slika 2.4. Slaganje 2D slojeva u 3D proizvod [1]

Posebna karakteristika aditivne proizvodnje je što se fizički modeli izravno grade na temelju računalnih 3D podataka o proizvodu. Podaci dobiveni iz CAD modela, na temelju mjerenja ili reverzibilnog inženjerstva, na temelju računalne tomografije (CT) ili magnetske rezonancije (MR), mogu se upotrijebiti za proizvodnju. Sa stajališta razvoja proizvoda, proizvodi načinjeni postupcima aditivne proizvodnje mogu se smatrati trodimenzijskim ispisom postojećih CAD podataka. [2]

Dva su temeljna koraka procesa:

1. Generiranje matematičkih informacija o slojevima – zasniva se isključivo na računalnom CAD modelu proizvoda, prikazano slikom 2.5. CAD model reže se u slojeve pomoću matematičkih metoda.
2. Generiranje slojeva fizičkog modela – informacije o slojevima rabe se za generiranje pojedinačnog fizičkog sloja na opremi za aditivnu proizvodnju. Ukupni zbroj pojedinačnih slojeva oblikuje fizički model proizvoda. [2]



Slika 2.5. Osnovni koraci pravljenja proizvoda postupcima aditivne proizvodnje

3. POSTUPAK TALOŽNOG OČVRŠĆIVANJA

Modeliranje topljenim depozitom ili taložno očvršćivanje (eng. Fused Deposition Modeling – FDM) kao jedan od postupaka aditivne proizvodnje razvijen je od strane S. Scott Crump-a kasnih 1980-ih, a tek 1990-ih komercijaliziran od tvrtke Stratasys. Izrada konceptnog dizajna bila je početna svrha ovog postupka, no s vremenom se počela koristiti za izradu dijelova za izravnu primjenu ili u nekim slučajevima za izradu ljevačkih jezgri. Zadnja dva desetljeća znatno se povećao udio ovog postupka na tržištu. [5]

U 2003. godini, Stratasys uspijeva prodati gotovo onoliko FDM strojeva kao i svi drugi postupci u kombinaciji. U 2006. godini, Stratasys je bio odgovoran za 54,7% sustava koji se prodaju. [5]

Prekretnica za FDM tehniku bila je 2007. godina. Tada je predstavljen RepRap projekt, s "open-source" programskom podrškom čiji sadržaj je moguće mijenjati, prepravljati i poboljšavati. Prema istraživanjima, u 2007. godini prodano je nešto više od 60 niskobudžetnih (ispod \$5000) FDM strojeva, da bi do 2014. godine taj broj porastao na 140 000. Proporcionalno tom rastu, povećana je i prodaja industrijskih strojeva (iznad \$5000) za aditivnu proizvodnju na ~13 000 komada. [5]

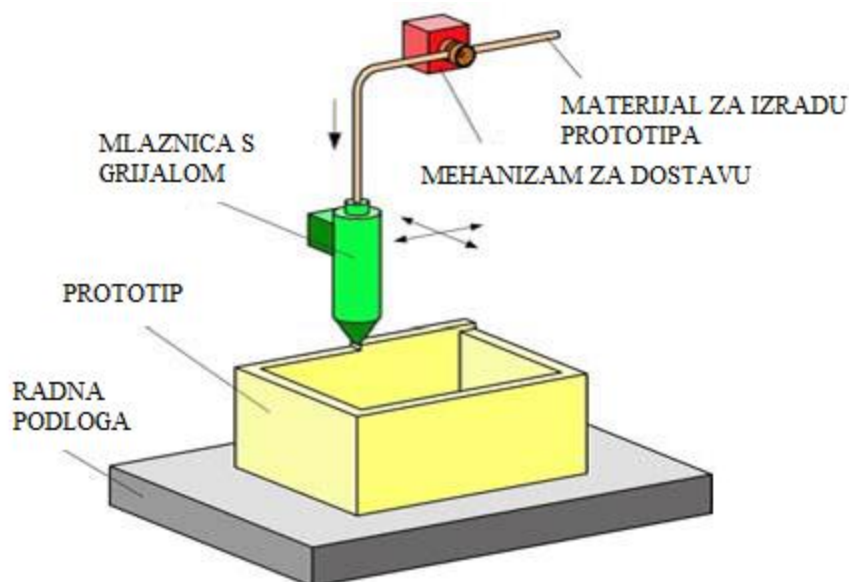


Slika 3.1. Prvi FDM stroj [6]

3.1. FDM – postupak taložnog očvršćivanja

Taložno očvršćivanje je postupak pri kojem se za izradu proizvoda rabi rastaljen, najčešće polimerni materijal. Uređaji za FDM rade na načelima troosnog NC obradnog centra. Kroz mlaznicu, upravljanu pomoću računala u sve tri osi, prolazi polimerni materijal u obliku žice, koji se u mlaznici zagrijava i tali, slika 3.2. Materijal napušta mlaznicu u kapljevitom stanju, a pri sobnoj temperaturi vrlo brzo očvršćuje. Stoga je osnovni zahtjev FDM procesa održavanje temperature kapljevitog materijala malo iznad temperature očvršćivanja. Tijekom građenja proizvoda materijal se ekstrudira i polaže na željena mjesta u vrlo finim slojevima. [1]

Platforma je kod nekih 3D printera također zagrijana na određenu temperaturu prilikom cijelog postupka. Budući da se materijal dobavlja kroz mlaznicu i izravno nanosi na prethodno očvršćeni sloj, mala je količina neiskorištenog materijala. [7]



Slika 3.2. Načelo postupka taložnog očvršćivanja (FDM) [8]

Za izradu proizvoda kompliciranije geometrije može se upotrijebiti i podupor. Tada je riječ o modificiranju postupka uporabom dvostruke glave ekstrudera. Pri tome jedna mlaznica nosi gradivni materijal, a druga vosak za podupiranje. U tom se slučaju između podupora i proizvoda postavlja sloj za razdvajanje, tako da se nakon izrade proizvoda podupor može bez teškoća odvojiti. [1]

Stratasys-ov softver „Catalyst“ za seriju Dimension automatski izrađuje potporne strukture koje je potrebno ukloniti nakon izrade 3D objekta jer nisu njegov sastavni dio.

Unutar softvera dolazi do „rezanja“ CAD datoteke u slojeve nakon što je objekt postavljen u optimalni položaj za izradu. Pri pozicioniranju modela u CAD datoteci potrebno je obratiti pozornost na smanjenje količine podupora, ako je ikako moguće pozicionirati model u takav položaj da mu uopće nisu potrebne potporne strukture. [6]

S obzirom da je proces proizvodnje slojevit, zbog toga je vrlo važno odabrati pravilnu orijentaciju modela tijekom izrade. To je najbitniji dio pripreme CAD modela za izradu ovom tehnologijom jer pravilan raspored sila osigurava model od pucanja tokom uporabe. Ako se model neće koristiti pod nekim opterećenjem, orijentacija modela nije bitna. Vrlo je važno najprije znati kako će se model koristiti nakon izrade, pod kakvim će opterećenjima biti i pod kojim temperaturama će se odvijati ta eksploatacija. [9]

FDM nudi širok izbor kada je u pitanju dizajniranje jer nudi dobru točnost tvorevina, a materijal koji se primjenjuje relativno je jeftin. Tvorevine načinjene postupcima FDM su izdržljive i idealne za manje volumene konceptnih modela, inženjerskih modela, proizvodnje alata i funkcionalnih prototipova.

3.2. Prednosti i nedostaci FDM postupka

Prednosti:

- Proizvodnja funkcionalnih dijelova - FDM postupkom je moguće proizvesti prototip koji će biti sličan onome koji se dobije postupkom lijevanja. ABS materijalom moguće je ostvariti do 85% čvrstoće lijevanog prototipa.
- Minimalni otpad - FDM postupak izgrađuje dijelove direktno iz polurastaljenog polimera. Upravo zbog takvog načina rada ne koriste se suvišni dodaci koje je potrebno obrađivati. Materijali koji se koriste služe za izradu modela i potporne strukture. Nakon samog postupka potrebno je vrlo malo ili nimalo čistiti i obrađivati proizvod.
- Lakoća uklanjanja potporne strukture - trenutno su u eksploataciji upotrebljavani sustavi *BASS* (eng. Break Away Support System) i *SSS* (eng. Soluble Support System).
BASS sustav uklanjanja potpornih struktura je dimenzioniran tako da se podupori uklanjaju pomoću mehaničke sile, odnosno, određeni dijelovi su namjerno oslabljeni kako bi se nakon izrade modela lakše uklonili (pokidali, otkinuli).
SSS sustav se bazira na materijalima koji su topivi ili razgradivi u tekućini (najčešće vodi ili kislini), te je tako olakšan postupak uklanjanja potporne strukture.

- Lakoća izmjene materijala - konstrukcijski materijal, koji se nalazi u spremniku, je u obliku jednostavnom za uporabu te se može mijenjati sukladno potrebama stroja. Zbog toga je održavanje i opskrbljivanje stroja materijalom vrlo jednostavno. [6]
- Nije potreban laser
- Manja potrošnja energije
- Nema zahtjeva za ventilacijom ili hlađenjem
- Jednostavna uporaba
- Relativno mala investicija
- Niski troškovi održavanja
- Male izmjere uređaja (nema zahtjeva za odvojen radni prostor)
- Nema vitoperenja proizvoda. [1]

Nedostaci:

- Ograničena točnost izrade modela - uobičajeno je za dijelove izrađene FDM postupkom da im točnost ovisi o obliku profila polimerne niti. U novijim strojevima se ova problematika rješava uvođenjem veće mogućnosti pozicioniranja glave ekstrudera kao i povećanjem točnosti samog stroja.
- Brzina (sporost) procesa - proces izrade je spor zbog ispunjavanja modela nosivim ispunama u obliku mreže ili čak potpune ispune. Brzina procesa je također uvjetovana brzinom ekstrudiranja i protokom materijala kroz glavu ekstrudera.
- Nepredvidljivost smanjenja dimenzija modela - prilikom FDM postupka gradivni materijal izlazi kroz glavu ekstrudera i hladi se u vrlo kratkom vremenu, dolazi do pojave naprezanja u materijalu i nepredvidljivosti ponašanja. Iskusni korisnici ovog postupka mogu nadzirati i ispravljati ovakva ponašanja materijala odabirući određene parametre temeljene na iskustvu. [6]
- Funkcionalnost proizvoda koja je ograničena izborom materijala
- Nužna izrada podupora
- Potrebna je naknadna obrada proizvoda
- Vidljive su linije između slojeva
- Čvrstoća proizvoda snižena je u smjeru okomitom na smjer izrade slojeva
- Oscilacije temperature tijekom postupka mogu dovesti do delaminiranja (raslojavanja) proizvoda. [1]

3.3. Materijali

Najbitnije od svih postavki su postavke temperature mlaznice i radne površine. Svaki materijal ima drugačiji sastav te o tome ovisi na koliko stupnjeva on prelazi iz čvrstog u kapljevito stanje. Temperatura prelaska materijala je različita čak i za isti materijal istog proizvođača, a različite boje. Cilj je točno odrediti temperaturu na kojoj je materijal dovoljno zagrijan da bez poteškoća izlazi iz mlaznice u jednom kontinuiranom toku, bez prekida, bez grudica, ali s druge strane dovoljno čvrst da se ohladi što je brže moguće, te da se smanji mogućnost deformiranja uslijed postupne promjene temperature. To se postiže jedino probnim ispisom nekoliko manjih modela, kako bi se ustanovilo na kojoj se temperaturi materijal ponaša najbolje. [5]

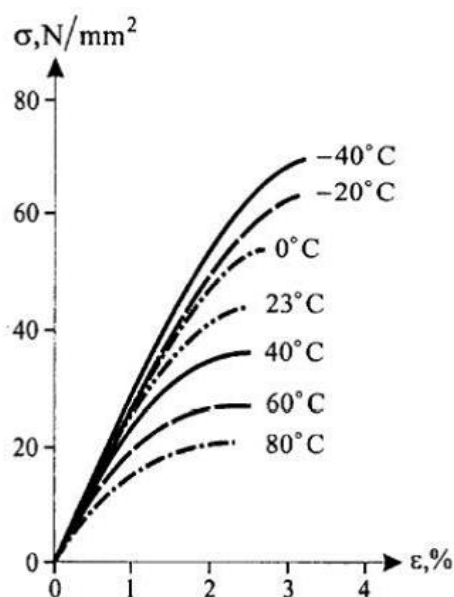
ABS (akrilonitril / butadien / stiren) je jedan od najkorištenijih polimera u svijetu RP-a. Uz PLA, najkorišteniji je materijal u FDM postupku za komercijalnu primjenu. Idealan je materijal za konceptijsku izradu prototipa. Može se opetovano upotrebljavati zbog toga što spada u skupinu plastomera. Odlikuje se otpornošću na koroziju i dinamičke udare, niskom temperaturom taljenja, relativno je jeftin. Na slici 3.3 je vidljiva σ - ϵ karakteristika ponašanja ABS-a pri porastu i smanjenju temperature. [6]

Stiren monomer daje ABS-u dobru mogućnost prerade i površinski sjaj, akrilonitril mu daje čvrstoću, toplinsku i kemijsku postojanost, dok butadien čini proizvod tvrđim i otpornijim čak i pri niskim temperaturama. [5]

ABS ima slabu otpornost na vremenske uvjete, pa se stoga preporučuje samo za primjenu u interijeru. Akrilonitril butadien stiren se općenito koristi u temperaturnom rasponu - 20°C i + 80°C. Otporan je na vodene rastvore kiselina, alkale, koncentriranu klorovodičnu i fosfornu kiselinu, alkohole, životinjske, biljne i mineralne masti, ali mu šteti koncentrirana sumporna i dušična kiselina. Akrilonitril butadien stiren je topiv u esterima, ketonima, etilen dikloridu ili acetonu. [5]

Tehnički parametri za primjenu ABS u FDM-u:

- Temperatura ispisa: 220°C - 260°C
- Temperatura podloge: 80°C - 110°C
- Brzina ispisa: 30 - 100 mm/s
- Brzina pozicioniranja: 90 - 150 mm/s [5]



Slika 3.3. Karakteristika ponašanja σ - ϵ ABS-M30 materijala pri promjeni temperature [6]

PC (Polikarbonat) nosi u sebi jedinstvenu kombinaciju tvrdoće, optičke transparentnosti, krutosti i čvrstoće. Amorfan je i proziran. Polikarbonatni materijali se proizvode uglavnom putem polikondenzacijske reakcije.

Polikarbonat je sam po sebi jedan od najprozirnijih polimera. Istovremeno, može se miješati u različite boje, od prozirnih nijansi do mat neprozirnih boja. Estetika polikarbonata je na najvišem nivou u spektru inženjerskih polimera.

Polikarbonat posjeduje superiornu UV stabilnost i to se može još poboljšati dodavanjem UV stabilizatora. Drugi aditivi mogu biti pojačivači za toplinu ili aditivi koji poboljšavaju pucanje pod pritiskom u okolini. PC se može puniti staklenim vlaknom kako bi se dodatno povećala krutost. [5]

Polikarbonat je industrijski plastomer koji se koristi širom automobilske, aeronautičke i medicinske industrije. Odlikuje se točnošću izrade, izdržljivosti i stabilnosti, te kao takav odlično podnosi funkcionalna testiranja (eksploatacijska). S obzirom na mehanička svojstva, bolji je od ABS-a i brojnih drugih plastomera. Prisutan je u FDM postupcima RP-a. Predmet dobiven polikarbonatom vidljiv je na slici 3.4. [6]



Slika 3.4. Prikaz proizvoda od polikarbonata [6]

PLA (polilaktička kiselina) je biorazgradivi polimer koji se dobiva iz laktičke kiseline te ga je moguće koristiti više puta taljenjem i ponovnom izgradnjom. Uz ABS je najkorišteniji polimer u RP-u za FDM postupak. Uzevši u obzir da je postupak taložnog očvršćivanja najzastupljeniji oblik RP-a u svijetu, dopušteno je reći kako ABS-u i PLA-u pripadaju najveće zasluge za izradu amaterskih prototipova.

PLA se odlikuje niskom temperaturom tališta (između 160 °C do 220 °C), ima veći faktor trenja od ABS-a, pa može biti uzrok začepljenja mlaznice ekstrudera. Čvršći je od ABS-a. Nedostatak mu je da lako upija vlagu iz okoline te je potrebno obratiti pozornost pri skladištenju ovoga materijala. Neki primjeri proizvoda napravljeni različitim vrstama polimera se nalaze na slici 3.5. [6]



Slika 3.5. Izgled proizvoda dobivenim iz raznih vrsta polimera [6]

Neki od ostalih materijala koji su postali popularni su polikarbonat, poliamid, polistiren, gumeni materijali, te PEEK (polieter/eter/keton) termoplastični plastomer koji se koristi za izradu modela koji se nalaze pod visokim temperaturama i opterećenjima u upotrebi. Njegova temperatura taljenja je oko 340 °C, što govori da je materijal vrlo kvalitetan i otporan na temperaturno djelovanje okoline. [9]

3.3.1. Potporni materijali

Podupor služi za sprječavanje vitoperenja slojeva tijekom izrade kompliciranije geometrije proizvoda. Gradi se ispod dijela konstrukcije koji visi u zraku tako da se gradivni materijal nanosi na potpornu strukturu. Materijal potporne strukture je topiv u vodi ili otapalima, ili se mehanički odstranjuje.

PPSF (polifenilen sulfon), vosak i akrilni polimeri primjenjuju se kao potporni materijali kod izrade prototipa. Vosak i akrilni polimeri se uklanjaju otapanjem, dok je PPSF tvrd, ali krhak zbog visokog stupnja tvrdoće, stoga se može lagano ručno ukloniti. [10]

3.3.2. Filament

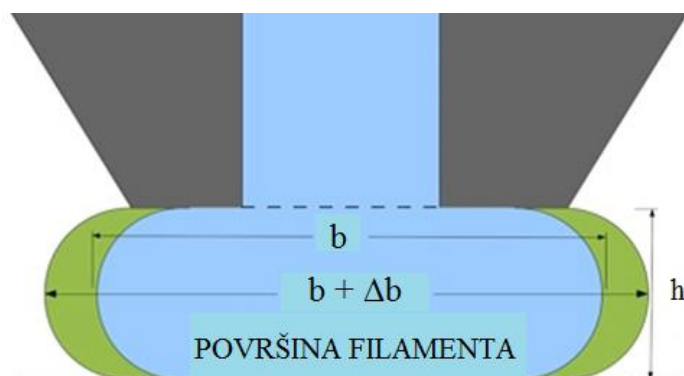
Filament je materijal koji se koristi za izradu proizvoda FDM postupkom. Nalazi se namotan u obliku tanke žice.

Materijal, odnosno filament, u obliku plastične niti ili žice, standardnog je promjera 1,75 mm ili 3 mm. Kod niskobudžetnih 3D printera nalazi se namotan na kolutu s kojeg se polako odmotava i dovodi putem mehanizma za dostavu materijala do mjesta gdje se grije, tali i na kraju izlazi kroz mlaznicu.



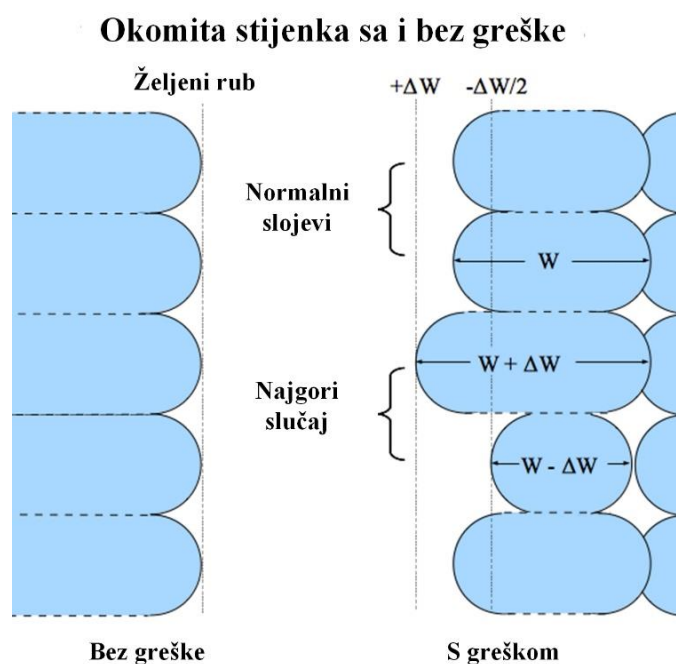
Slika 3.6. Filament [11]

Na slici 3.7. prikazana je širina filameta b i tolerancija širenja u taljenom stanju, tijekom prijanjanja na prethodni sloj izrađivanog proizvoda. Različite vrste materijala imaju i različite sklonosti ka pogrešci. PLA je teže istiskivati od ABS-a.



Slika 3.7. Filament [12]

Na slici 3.8. prikazana je gradnja vertikalne stijenke pomoću slojeva filamenata. Na lijevoj strani je prikazana stijenka bez grešaka, a na desnoj s greškama, gdje je prikazano kako izgleda zid kada širina sloja nije ujednačena. Vide se tragovi pod utjecajem maksimalne pozitivne i negativne pogreške dopuštene za određenu toleranciju. Pozitivna pogreška će proširiti rub za oko dva puta udaljenosti od negativne pogreške, što će dovesti do prethodne postavljene niti. Ovime se utvrđuje da će prevelika količina materijala ostvariti vizualno loše otiske, koji su i strukturno loši, skloni lomljenju i delaminiranju.



Slika 3.8. Stijenka filameta [12]

Filament koji nema pravilan kružni poprečni presjek će za rezultat dati loš proizvod.

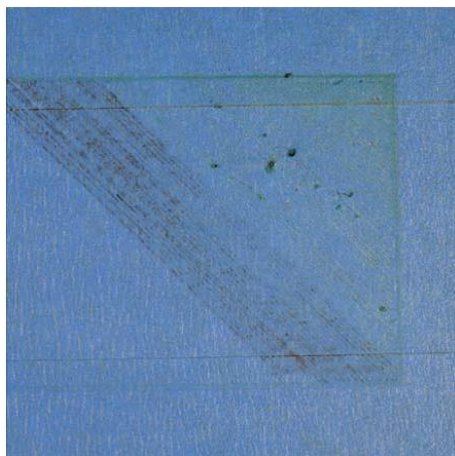
Utjecaj na kvalitetu tiskanog proizvoda:

- visoko kvalitetni filament je kontinuiranog kružnog presjeka sa niskom tolerancijom pozitivnih i negativnih pogrešaka
- filament promjera 1,75 mm sa istom tolerancijom filameta promjera 3 mm će imati dva puta više grešaka
- velik omjer širine i visine filameta će imati veće pogreške tragova od manjeg omjera širine i visine [12]

3.4. Mogući problemi i rješenja tijekom izrade proizvoda FDM postupkom [12]

Ukoliko nema ekstrudiranja materijala na početku printanja moguće je da ekstruder nije ispunjen materijalom, što dovodi do stvaranja okvira oko proizvoda ili je začepljen, stoga ga je potrebno rastaviti i očistiti. Isto tako, postoji mogućnost da je mlaznica ekstrudera preblizu radnog stola, stoga ju je potrebno ponovno postaviti.

Potrebno je provjeriti rade li pogonski zupčanik i filament sinkronizirano, jer zbog toga dolazi do brušenja filameta.

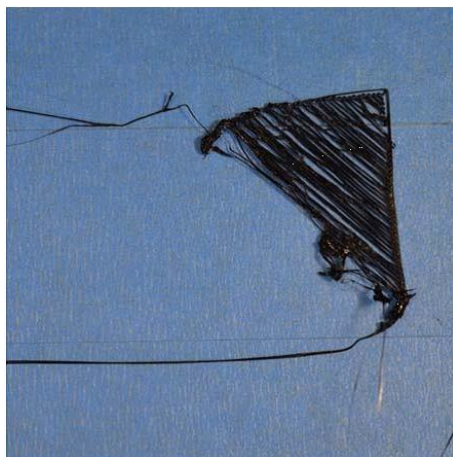


Slika 3.9. Bez ekstrudiranja materijala [12]

Ukoliko se ispis ne lijepi za radnu podlogu postoji mogućnost da stol nije niveliran, te se mora izravnati ili je mlaznica predaleko od radne podloge. Potrebno je provjeriti brzinu printanja prvog sloja, jer ako je printanje prebrzo, mora se reducirati brzina printanja.

Ako su temperature grijanja i hlađenja krivo postavljene, može doći do skupljanja prvog sloja. Mora se postaviti odgovarajuća temperatura i onesposobiti ventilator za hlađenje za nekoliko prvih slojeva.

Potrebno je izgladiti površinu prijanjanja čišćenjem radne podloge, postavljanjem trake za materijale kao što su ABS i PLA ili nanijeti lak za kosu ili privremeno ljepilo. Kao alternativa, moguće je izgraditi posebnu površinu za printanje proizvoda.



Slika 3.10. Filament odlijepljen od radne podloge [12]

Do pogreške prvog sloja može doći ako je preniska temperatura ekstrudera ili radne podloge, krivo usmjerena mlaznica ekstrudera ili je premala debljina prvog sloja.



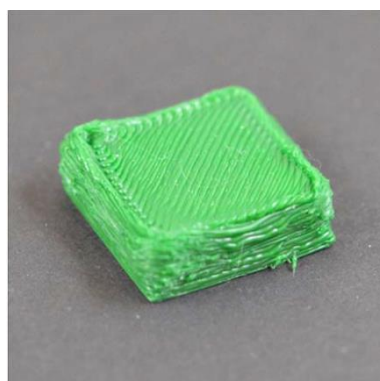
Slika 3.11. Pogreška prvog sloja [12]

Do nedovoljno ekstrudiranja materijala može doći zbog netočnog promjera filameta ili nedovoljnog protoka materijala kroz ekstruder. Protok bi trebalo povećati za 5% i pokušati ponovno.



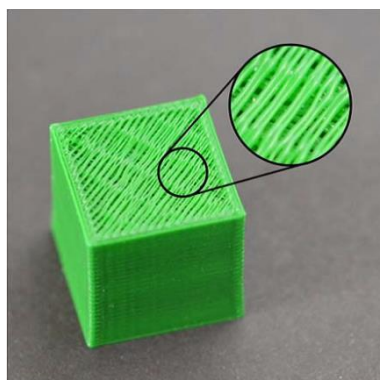
Slika 3.12. Nedovoljno ekstrudiranje materijala [12]

Problem prevelike količine ekstrudiranog materijala može doći zbog prevelikog promjera filamenta. Potrebno je smanjiti filament za 5% i pokušati ponovno.



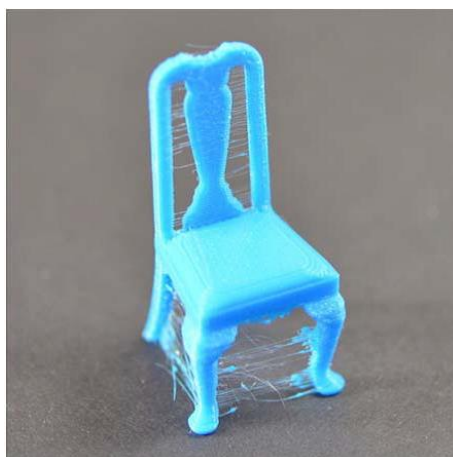
Slika 3.13. Previše ekstrudiranog materijala [12]

Rupe i praznine u zadnjim slojevima mogu nastati zbog nedovoljno čvrstih slojeva ili preniskog postotka popunjenosti ekstrudera materijalom.



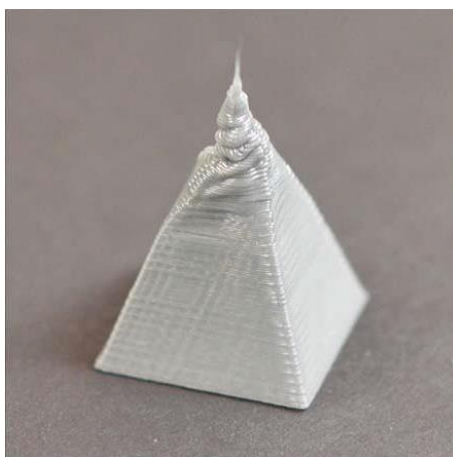
Slika 3.14. Rupe i praznine u gornjim slojevima [12]

Do pojave niti u međuprostorima proizvoda može doći zbog nedovoljne udaljenosti ekstrudera, previsoke temperatura printanja, predugog puta ekstrudera u otvorenom prostoru i premale brzine kretanja ekstrudera. Kao rješenje tih problema predlaže se povećati udaljenost ekstrudera za 1 mm i podesiti softver.



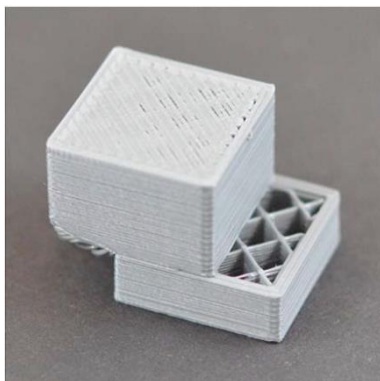
Slika 3.15. Pojava niti [12]

Pregrijavanje se može javiti zbog ispisa proizvoda uz prevelike temperature ili prevelike brzine ekstrudera. Potrebno je upotrijebiti ventilator ili smanjiti temperaturu ispisa ili brzinu kretanja ekstrudera. Bilo bi poželjno da pri gornjim slojevima ekstruder printa neki drugi komad dok se vrh malo ne ohladi, tada bi se dobio bolji završetak.



Slika 3.16. Pregrijavanje proizvoda [12]

Pomicanje slojeva uzrokuje prevelika brzina ekstrudera ili mogući mehanički ili električni problemi. Ukoliko se to desi, treba provjeriti napetost remena ili poziciju motora.



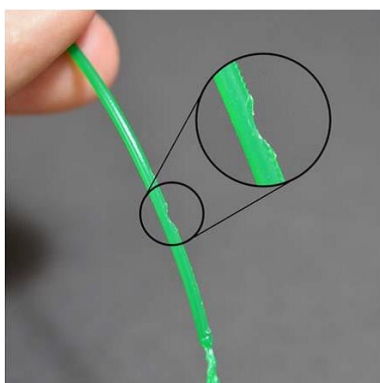
Slika 3.17. Pomicanje slojeva [12]

Raslojavanje se pojavljuje zbog prevelike visine sloja ispisa pri preniskoj temperaturi.



Slika 3.18. Raslojavanje [12]

Brušenje filameta uzrokuje preagresivno postavljena funkcija *retraction*, printanje pri preniskoj temperaturi, prebrzo printanje i začepljen ekstruder.



Slika 3.19. Brušenje filameta [12]

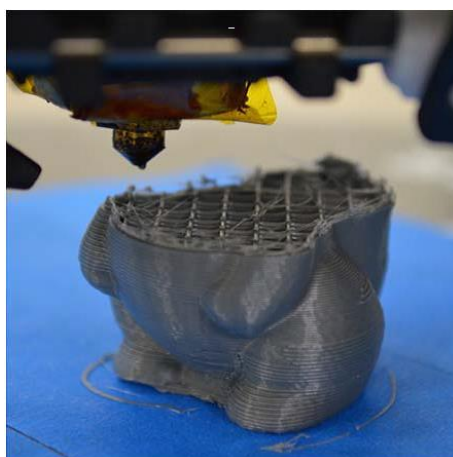
Ukoliko dođe do začepjenja ekstrudera, potrebno je ručno pogurati filament kroz ekstruder, ponovno napuniti ekstruder filamentom i očistiti mlaznicu.



Slika 3.20. Začepljen ekstruder [12]

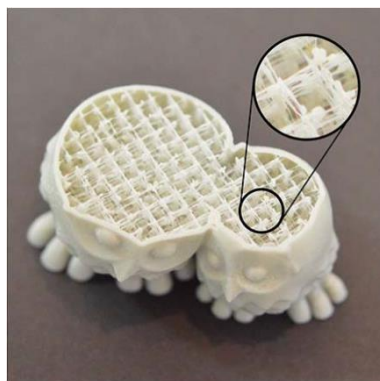
Ako dođe do zaustavljanja ekstrudiranja tijekom printanja najčešći uzrok je nedostatak filameta ili je filament pao sa pogonskog zupčanika.

Postoji mogućnost pregrijavanja motora, pa tako i ekstrudera. Potrebno ga je isključiti i ohladiti dodatnim ventilatorom za hlađenje motora.



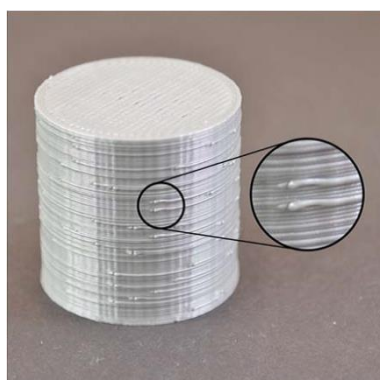
Slika 3.21. Prestanak ekstrudiranja tijekom printanja [12]

Ako je količina ispune nedovoljna, treba odabrati drugu vrstu ispune, smanjiti brzinu ispisa i povećati širinu ekstrudiranja.



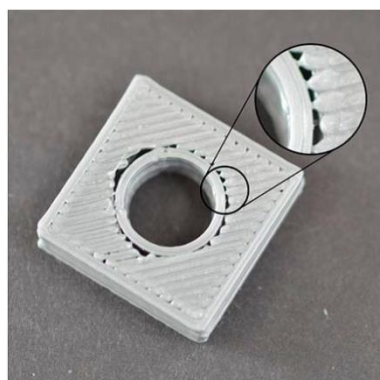
Slika 3.22. Nedovoljna količina ekstrudirane ispune [12]

Ispupčenja se mogu pojaviti zbog loše postavljenih parametara ekstrudera i loše odabrane polazne pozicije ekstrudera.



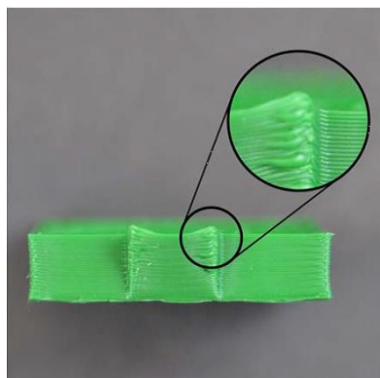
Slika 3.23. Ispupčenja [12]

Praznine između ispune i konture se rješavaju povećanjem vrijednosti preklapanja ispune i konture, te je potrebno smanjiti brzinu ispisa.



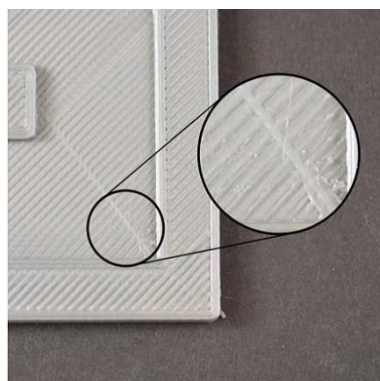
Slika 3.24. Praznine između ispune i konture [12]

Savijanje slojeva se javlja zbog pregrijavanja materijala. Rješenje problema je smanjiti temperaturu i brzinu ekstrudiranja.



Slika 3.25. Savijanje slojeva [12]

Brazgotine na gornjoj površini javljaju se zbog previše ekstrudiranog materijala ili se mlaznica povlači po gornjoj površini, stoga ju je potrebno okomito podići.



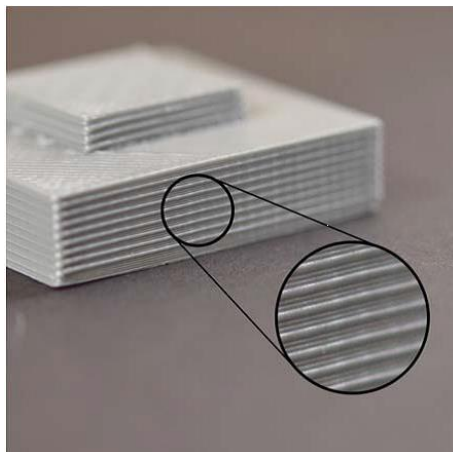
Slika 3.26. Brazgotine na gornjoj površini [12]

Praznine u uglovima proizvoda se javljaju zbog premale debljine konture, nedovoljnog broja gornjih čvrstih slojeva i malog postotka ispune.



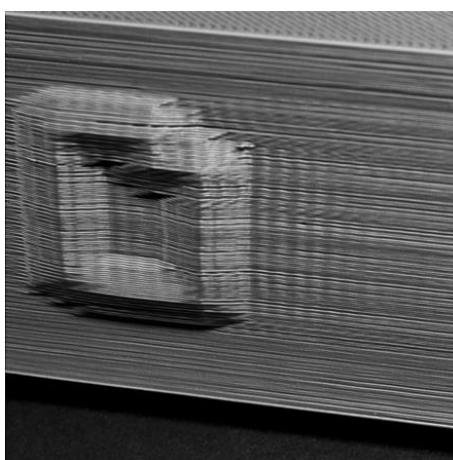
Slika 3.27. Praznine u uglovima proizvoda [12]

Pojava linija na isprintanom proizvodu je zbog nedostatne ekstruzije materijala. Potreban je bolji printer ili kvalitetniji filament. Moguće su varijacije temperature ekstrudera ± 2 stupnja ili pojava mehaničkih problema printera.



Slika 3.28. Pojava linija na isprintanom proizvodu [12]

Ispupčenja se javljaju zbog vibracija prilikom prevelikih brzina printanja ili brzine ekstrudera tijekom promjene smjera ispisa.



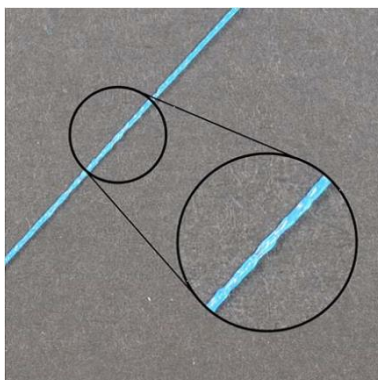
Slika 3.29. Pojava ispupčenja zbog vibracija [12]

Praznine u tankim stijenkama proizvoda rješavaju se softverskim podešavanjem popunjavanja ispune ili povećanjem ekstrudiranog materijala uz mijenjanje širine ekstrudiranja ili debljine sloja.



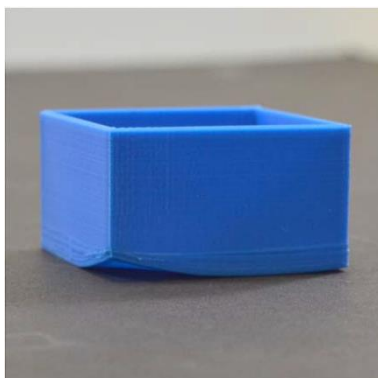
Slika 3.30. Praznine u tankim stjenkama proizvoda [12]

Nekontinuirana ekstruzija moguća je zbog začepljenja ekstrudera, zaustavljanja filamenta ili njegove loše kvalitete, preniske visine sloja ili netočne širine ekstruzije.



Slika 3.31. Nekontinuirano ekstrudiranje [12]

Kako bi se izbjeglo savijanje proizvoda potrebno je ugrijati radnu plohu, onеспособiti ventilator, koristiti grijanu oblogu oko proizvoda ili napraviti prijelaz iznad radne plohe.



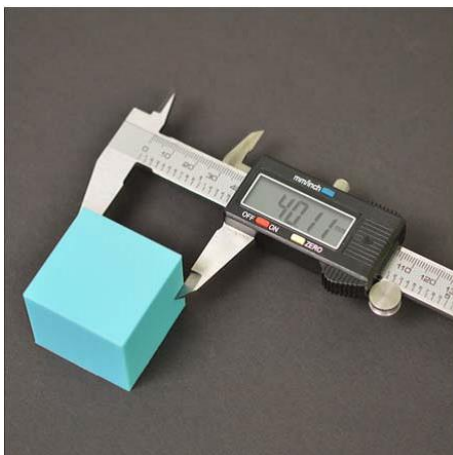
Slika 3.32. Savijanje proizvoda [12]

Loš vizualan izgled površine proizvoda iznad podupora moguć je zbog prevelike debljine sloja ili premaloga postotka ispune. Bilo bi potrebno poboljšati postotak ispune, primijeniti drugi ekstruder i koristiti podupor koji je topiv u vodi, kao što je PVA.



Slika 3.33. Loša površina proizvoda iznad podupora [12]

Ukoliko dođe do dimenzijske netočnosti potrebno je ponovno podesiti postavke dimenzija u softveru printera i poznavati vrijednost skupljanja materijala tijekom hlađenja.



Slika 3.34. Dimenzijska netočnost [12]

4. PARAMETRI FDM POSTUPKA

Kod postupka taložnog očvršćivanja parametri prerade ovise o softveru i proizvođaču stroja. Svaki proizvođač 3D printera razvija svoj softver u kojem je moguće podešavati parametre prerade, a pojedine skupine parametara ostavljaju otvorenim kako bi se njihovom izmjenom mogli ispuniti vlastiti zahtjevi za tvorevinom. U upotrebi su i programi otvorenog tipa gdje je parametre moguće mijenjati i kombinirati, ovisno o zahtjevima izrade. Prilagodbom parametara moguće je utjecati na geometriju, kvalitetu, funkcionalnost tvorevine, vrijeme izrade, te mnoge druge karakteristike.

Ako su neke vrijednosti parametara previsoke, preniske ili ovise o drugom parametru, može doći do nepravilnosti izratka. Pri izboru parametara važno je prvenstveno proučiti postavljene zahtjeve na tvorevinu, odnosno materijal kojim se izrađuje.

Uz mehanička svojstva i funkcionalnost tvorevine, bitan je i estetski izgled. Loše izrađeni slojevi mogu dovesti do vitoperenja dijelova tvorevine, a do toga dolazi zbog nedovoljno zagrijanog ekstrudera, nedovoljno zagrijane radne podloge, nedovoljno zagrijane i omekšane žice materijala, prebrzog ili presporog hlađenja izrađenih slojeva ili netočno kalibriranih mlaznica ekstrudera. Vanjska oštećenja tvorevine najčešće su uzrokovana uklanjanjem podloge.

4.1. Ispuna

Kod izrade tvorevina načinjenih taložnim očvršćivanjem na primarnom mjestu je izrada vanjskog oblika predmeta zbog svojeg vizualnog izgleda, a na sekundarnom mjestu je vrsta ispune. [13]

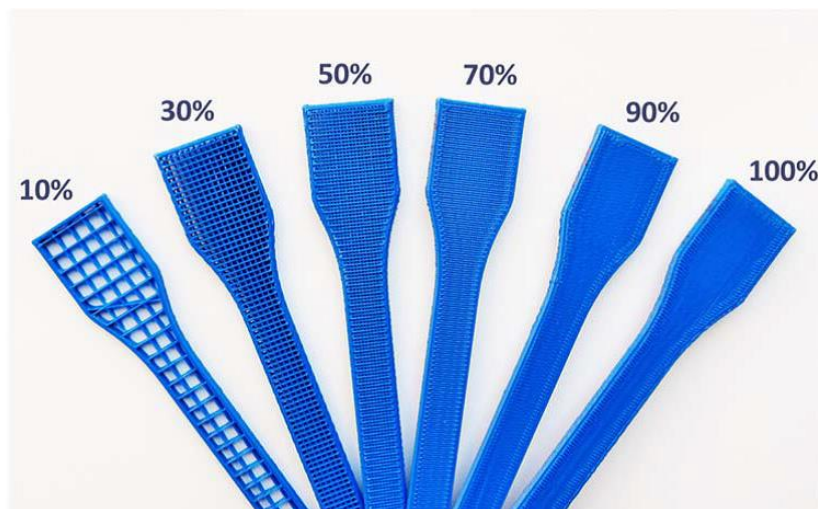
Osim funkcije da tvorevina ostane kruta, također pridonosi smanjenju troškova same proizvodnje i vremenu potrebnom za tiskanje, te je zbog toga potrebno odabrati optimalnu ispunu. Ako je gustoća ispune jako mala, može doći do nepravilnosti i pogrešaka pri izradi. Veća gustoća ispune povišuje čvrstoću i masu tvorevine te vrijeme njezine izrade. Za tvorevine praktične svrhe potrebna je veća gustoća ispune.

Razvijeno je nekoliko vrsta ispuna koje se često primjenjuju kod FDM postupka, ali premda je FDM relativno novi postupak koji se još uvijek razvija, nove vrste ispuna se razvijaju od strane profesionalnih korisnika, tvrtki te i od privatnih osoba.

Ispune se dijele na dvije osnovne skupine: puna struktura i mrežasta struktura. [13]

4.1.1. Ispuna pune strukture

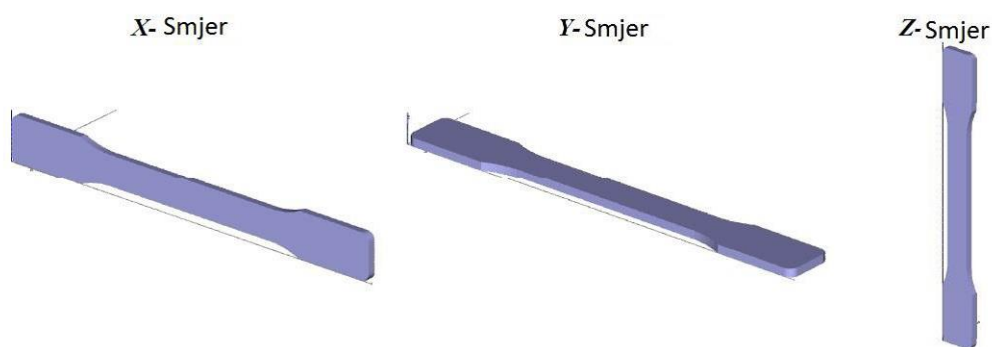
Najpopularnija puna ispuna je tzv. *raster fill* koja se sastoji od tankih rastaljenih niti orijentiranih pod kutom od 45° u odnosu na x-os u jednom sloju, dok su u sljedećem sloju zaokrenute za 90° tako da čine mrežu. [14]



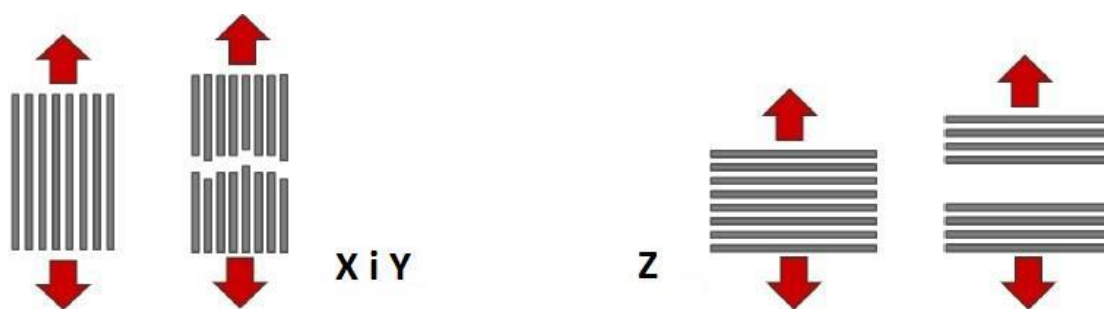
Slika 4.1. Prikaz postotka ispune na ispitnim epruvetama [12]

Mehanička svojstva ispune ovise o orijentaciji tvorevine prema X , Y , i Z osi. Tvorevina koja je izrađena u smjeru X osi ima najvišu vlačnu čvrstoću, a u smjeru Y osi manju, dok u Z osi ima najmanju vlačnu čvrstoću. Razlog tome je smjer opterećenja koji djeluje na ispitno tijelo.

U smjeru X osi ostvaruje se najviša vlačna čvrstoća jer je ispuna orijentirana gotovo usporedno s pravcima djelovanja sile pa sukladno tome mogu podnijeti opterećenje koje može podnijeti i sam materijal iz kojeg su izrađene. Kod vertikalnog tiskanja u smjeru osi Z rastezna čvrstoća ovisi o sljepljivanju slojeva međusobno. [14]



Slika 4.2. Orijentacija rasteznih ispitnih tijela u radnom prostoru [14]



Slika 4.3. Vrsta loma kod ispitivanja tijela u X , Y i Z smjeru [14]

Pritisna čvrstoća također ovisi o orijentaciji predmeta između X , Y i Z osi. Pritisna čvrstoća bit će najveća u smjeru osi Z , a najmanja u smjeru osi X i Y . Razlog tome je što su u slučaju XY osi niti orijentirane usporedno sa smjerom djelovanja sile. Zbog suprotnog djelovanja sile doći će do pucanja, jer sila djeluje na manjoj površini zbog lošeg lijepljenja među nitima. Pritisna čvrstoća će u smjeru osi Z biti najviša jer je sila okomita na niti, pa lošije lijepljenje među nitima ne dolazi do izražaja. [14]

4.1.2. Ispuna mrežaste strukture

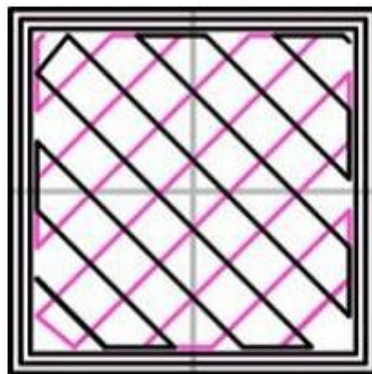
Mrežaste strukture se razlikuju od punih struktura po obliku ispune, ali i po samoj gustoći ispune. Gustoća ispune se mjeri na ljestvici od 0 do 1. Dok broj 1 predstavlja 100% ispunu, na primjer 0,4 predstavlja 40% ispunu. U većini slučajeva nema potrebe da se kod modela od polimera radi ispunu od 100%, jer bi to bilo trošenje vremena i materijala. Gustoća ispune od 40% je kod većine modela dovoljna da se osiguraju dobra mehanička svojstva, a može biti i manja ovisno o potrebnim mehaničkim svojstvima. [15]

Različite vrste ispuna mogu se napraviti samostalnim programiranjem prema individualnim željama korisnika, samo što je za to potrebno uložiti puno vremena i znanja. 3D uređaji koji za FDM postupak često dolaze s tvornički definiranim mogućnostima tiskanja, ali postoje i različiti softveri koji omogućuju druge vrste ispuna. [15]

4.1.2.1. Pravocrtna ispuna

To je ispuna kod koje su niti polimera pomaknute za 45° u odnosu na X - os u jednom sloju, a u sljedećem su sloju zaokrenute za 90° . Uzorak je isti kao kod pune ispune obrađene u poglavlju 4.1.1., jedino se međusobno razlikuju u samoj gustoći ispune. Ova ispuna pridonosi podupiranju vanjske ljuske predmeta, dok je negativna strana ove ispune loša mehanička svojstva zbog porozne strukture. Podupiranje vanjske ljuske predmeta kao i naprezanja prenose se po mjestima koja se preklapaju, a ta mjesta ovise o samoj gustoći ispune.

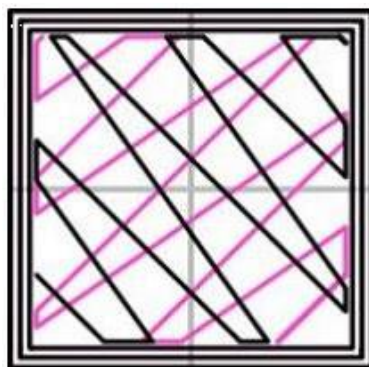
Ispuna se može primijeniti za tvorevine koje nisu namijenjene za podnošenje većih opterećenja kao što su: slobodno stojeće figurice, tvorevine koje moraju podnijeti samo svoju težinu, mehanički dijelovi za pridržavanje, itd. [15]



Slika 4.4. Pravocrtna ispuna [15]

4.1.2.2. Linijska ispuna

Linijska ispuna slična mehanička svojstva kao kod pravocrtne ispune čiji je glavni cilj smanjiti utrošak materijala. Na slici 4.5. prikazana je ispuna s linijama u naizmjeničnim smjerovima i pod drukčijim kutovima. [15]

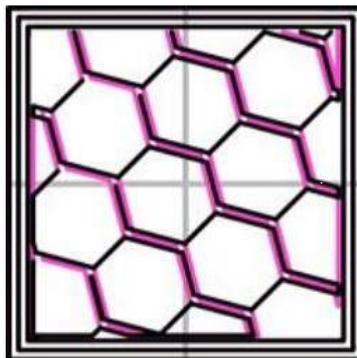


Slika 4.5. Ispuna linijama [15]

4.1.2.3. Šesterokutna ispuna

Šesterokutna ispuna ili struktura pčelinjih saća odlikuje se dobrim mehaničkim svojstvima. Zbog toga jer se svaki novi sloj podudara s prethodnim pa je površina lijepljenja veća. Sila unutar same tvorevine se ravnomjernije raspoređuje nego kod drugih ispuna zbog jedinstvenog oblika što se može vidjeti i na samoj tvorevini.

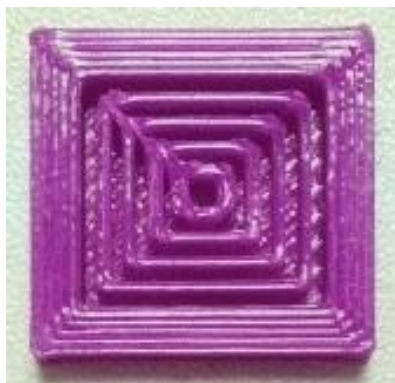
Šesterokutna ispuna puno bolje prati oblik tvorevine nego pravocrtna stoga je tvorevina kruća i čvršća. Nedostatak je taj što za izradu treba više vremena, a i materijala. [15]



Slika 4.6.Šesterokutna ispuna [15]

4.1.2.4. Ostale ispune

Ispune koje nisu toliko popularne i koje se ne primjenjuju tako često također imaju istu funkciju kao i ostale ispune. Osim te funkcije one svojim različitim dizajnom izgledaju primamljivije u marketinškom svijetu. Tako na primjer postoje još koncentrične ispune, ispuna sa Hilbert krivuljama, spiralni oktagram i ispuna u obliku Arhimedovih krivulja. [13]



a)

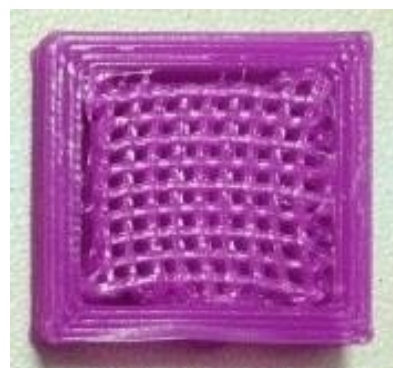


b)

Slika 4.7. a) koncentrična ispuna, b) ispuna u obliku Hilbertovih krivulja [16]



a)



b)

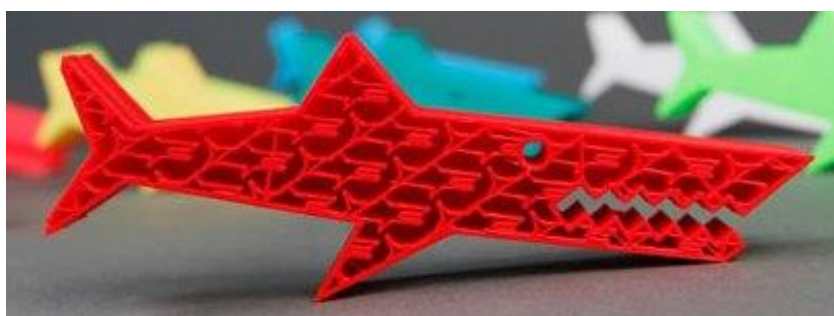
Slika 4.8. a) spiralni oktagram, b) ispuna u obliku Arhimedovih krivulja [16]

4.1.2.5. Posebne ispune

Ispune osim što osiguravaju mehaničke osobine predmeta one također mogu imati i vizualnu funkciju. Na slici 4.9. tiskan je predmet gdje je za ispunu upotrebljena ispuna koja ima oblik mačke. Isto tako je i na slici 4.10. tiskan predmet u obliku morskog psa s ispunom morskog psa. [17]



Slika 4.9. Cat infill [18]



Slika 4.10. Shark infill [18]

4.2. Konture

Konture su zatvoreni poligoni koji se ne sijeku jedni s drugima. Stroj pomicanjem mlaznice po radnom prostoru stroja razvlači rastopljenu i spljoštenu plastičnu nit te tako čini konture modela.

Vrlo bitna je *retraction* funkcija, jer kontrolira koliko će se materijala povući nazad pri završetku izrade sloja ili kontura modela na jednom sloju. Mjeri se u milimetrima uvučenog materijala kod ekstrudera prije taljenja.

Loše postavljena vrijednost uzrokuje nedovoljno povlačenje materijala koji ostaje slobodan te se tako razvlači između kontura ili dijelova modela, a model ispada vrlo neuredan.

4.2.1. Konstrukcija konture

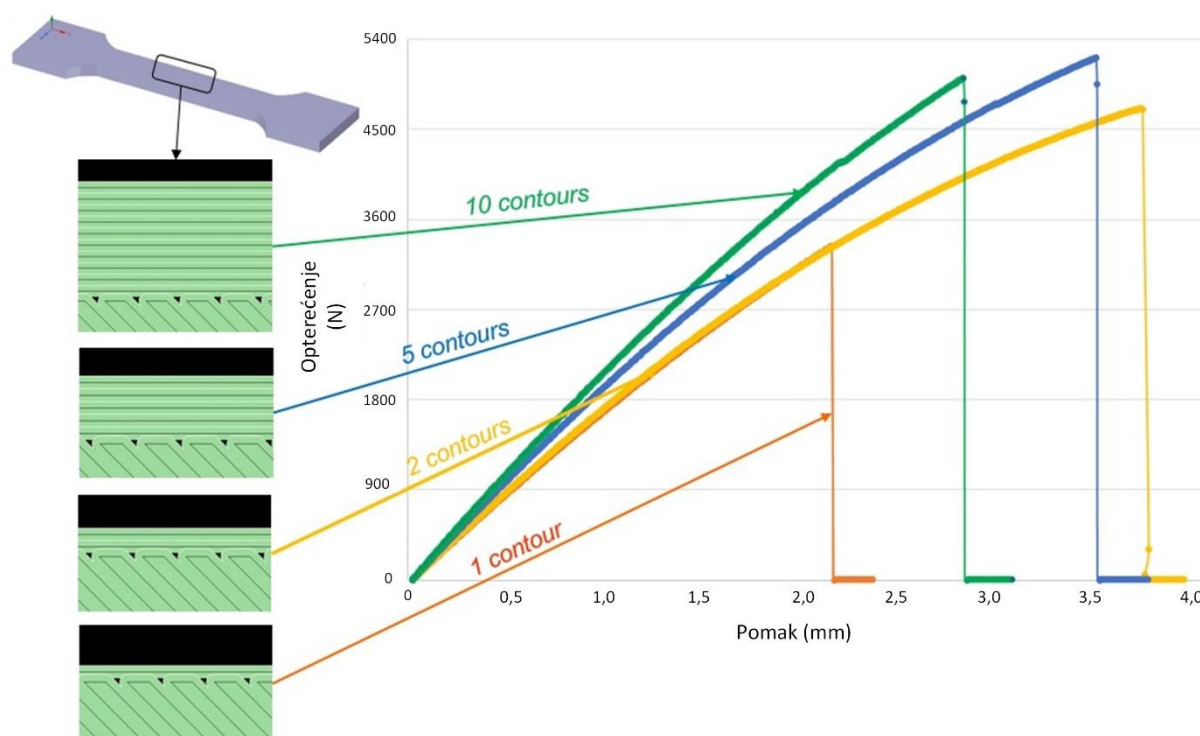
Početni i krajnji vrhovi jedne linije su u dodiru sa susjednim vrhovima. Tako početak jedne linije leži u istom vrhu kao i kraj susjedne linije. Na takav način traže se i spajaju sve linije. Ovaj proces trebao bi proizvesti ispravne konture samog presjeka. [19]

4.2.2. Ispunjavanje konture

Ispunjavanje konture predstavlja jedan od najčešćih problema kako u grafičkoj analizi, tako i u brzom izradi prototipa. Obris je definiran poligonom čija unutrašnjost mora biti pravilno ispunjena. Kada su linije tangentne na obris, točka dodira mora se brojati dvaput kao sjecište. Važno je napomenuti da algoritam nije ograničen na jednostavne poligone, nego može ispuniti svaku unutrašnjost čiji su obrisi zajedno posloženi. [19]

4.2.3. Broj kontura

Na slici 4.11. prikazan je utjecaj rasta broja konturi na čvrstoću tvorevine. Uzorcima je debljina sloja zadržana, a mijenjan je broj kontura od jedne konture do deset. Na dijagramu je vidljivo ukoliko broj kontura raste, rasti će i rastezna čvrstoća uzorka u XY ili XZ smjeru.



Slika 4.11. Utjecaj broja kontura na čvrstoću tvorevine [12]

4.3 Debljina sloja

Visina sloja određuje debljinu svakog tiskanog sloja izrađivane tvorevine.

Visina sloja se naziva i mjerom rezolucije 3D ispisa, ali to utječe samo na rezoluciju u smjeru osi Z. Rezultat tiskanja tanjih slojeva je glatka površina, ali istodobno se povećava vrijeme izrade. [20]

Svi slojevi se izrađuju jednako dugo vremena, bez obzira na zadanu visinu, dok tanji slojevi povećavaju ukupan broj slojeva za ispis. [20]

4.4. Temperatura

Više brzine istiskivanja zahtijevaju i više temperature. Tijekom ispisa, plastična žica se uvlači u ekstruder, gdje omekšava prije nego se istisne na radnu podlogu. Omekšavanjem žice, toplina prelazi s toplinske jezgre ekstrudera na materijal, zagrijavajući žicu i hladeći ekstruder. Grijač daje toplinu ekstruderu kako bi se održala temperatura potrebna za omekšavanje žice, a kada se žica provlači brže, brže i ekstruder gubi na toplini. [20]

Različite vrste materijala imaju različite temperature tališta. Zagrijavanje radne podloge omogućuje omekšanom materijalu da se pričvrsti za nju bez smicanja.

ABS je tvrd i u manjoj mjeri fleksibilan, a omekšava s porastom temperature. To znači da prilikom istiskivanja omekšava brže, ali ne kaplje kod praznog hoda alata. ABS također ima visoki stupanj toplinske ekspanzije, pri grijanju se širi, a pri hlađenju skuplja što može dovesti do problema pri ispisu. Kako se tek ekstrudirani slojevi brzo hlade i skupljaju, dolazi do stvaranja naprezanja na slojevima ispod, što može dovesti do vitoperenja tvorevine. Kada je veza između dva sloja slaba, skupljanje izrađivanog sloja može uzrokovati njegovo odvajanje od prethodnog sloja, što rezultira pukotinama u horizontalnom smjeru tvorevine. Pri povišenoj temperaturi stvaraju se jače veze između slojeva, ali je istodobno i viša razlika u temperaturi između izrađivanog i prethodno završenog sloja. Najbolji način izbjegavanja vitoperenja i pucanja tvorevine je zadržavanje cijele tvorevine zagrijanom. [20]

4.5. Brzina i vrijeme ispisa

Brzina i vrijeme ispisa su međusobno ovisni parametri koji ovise o veličini otpreska. Na printerima temeljenim na taložnom očvršćivanju definira se minimalno vrijeme za izradu jednog sloja.

Parametrom vremena izbjegava se prijevremeno istiskanje na još uvijek rastaljeni materijal prethodnog sloja. Potrebno je posebnu pažnju posvetiti određivanju parametra brzine na oštrim rubovima, kako bi se postigla bolja kvaliteta površine.

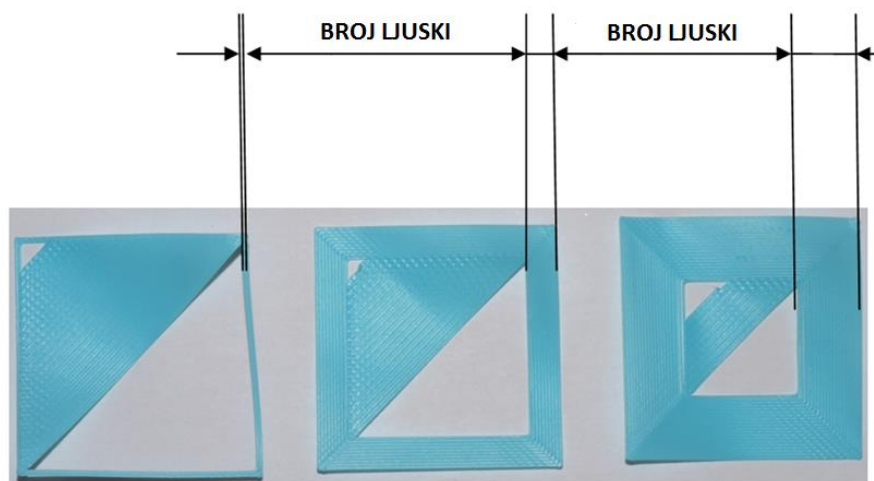
4.6. Broj vanjskih slojeva

Broj vanjskih slojeva je broj ljusaka odnosno linija koje se tiskaju prije ispune ili prije nego ekstruder krene raditi novi sloj.

Ako bilo koji sloj izrađivane tvorevine ne može primiti zadani broj vanjskih slojeva, stroj će ispisati onoliko slojeva koliko je moguće.

Na niskobudžetnim 3D printerima temeljenim na FDM postupku mogu se podesiti parametri na način da pri vrijednosti *nula* ispuna u potpunosti dodiruje unutarnju ljusku, a pri vrijednosti *jedan* je dodir jedva zamjetan. Preporuka je da se ispuna i unutarnje ljuske dodiruju. [20]

Svaka izrađivana tvorevina mora sadržavati najmanje jednu ljusku, odnosno vanjski sloj. Moguće je zadati proizvoljan broj vanjskih slojeva koje će se tiskati koncentrično poput ograde pri izradi svakog sloja. Dodatni broj vanjskih slojeva povećavaju čvrstoću tvorevine, njenu težinu i potrebno vrijeme izrade. [20]



Slika 4.12. Broj vanjskih slojeva [12]

4.7. Početni i završni slojevi tvorevine

Početni i završni slojevi tvorevine moraju imati dovoljnu debljinu kako bi kvalitetno izvršavali svoju funkciju pružanja čvrstoće tvorevini.

Loše izrađeni pojedini slojevi mogu dovesti do vitoperenja dijelova tvorevine. Do takvih pogrešaka može doći zbog nedovoljno zagrijane žice materijala, nedovoljno zagrijanog ekstrudera, nedovoljno zagrijane radne podloge, netočno kalibriranih mlaznica ekstrudera, te prebrzog ili presporog hlađenja netom izrađenih slojeva.

4.8. Potporna struktura

Potporna struktura omogućuje izradu „visećih“ dijelova tvorevine. Nakon završene izrade, potporna struktura se jednostavno uklanja otkidanjem kliještima ili prstima. Prilikom uklanjanja potporne strukture mogu nastati površinske nepravilnosti koje zahtijevaju naknadnu završnu obradu.

Materijali koji se koriste kao podupor kod FDM postupka opisani su u poglavlju 3.3.1.

4.9. Podloga

Prije tiskanja tvorevine tiska se ravna podloga koja pomaže tvorevini da bude sigurno pričvršćena na podlogu. Podloga se sastoji od više slojeva koji međusobno tvore ravnu površinu na koju naliježe izrađivana tvorevina. [20]

Središnji slojevi tiskani su između temeljnog i površinskog sloja podloge.

Postoji mogućnost da radna podloga stroja ima neravnine, zato se upotrebom podloge mogu izbjeći neispravnosti i pogreške. Temeljni sloj podloge je deblji od tiskanih slojeva tako da podloga bolje prijanja na radnu površinu stroja. [20]

Tvorevine se mogu izrađivati sa ili bez izrade podloge. U slučaju upotrebljavanja podloge gotovu tvorevinu je lakše odstraniti s radne podloge stroja, ali donja površina tvorevine nakon odstranjivanja podloge je hrapavija od one kod tvorevine koja se izrađuje bez podloge. [20]

5. NISKOBUDŽETNI PRINTER KLONER3D

Korišteni uređaj za printanje ispitnih tijela je KLONER3D 300H, a prikazan je na slici 5.1. Printer se nalazi na Katedri za preradu polimera i drva, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 5.1. KLONER3D 300H [21]

U usporedbi s ostalim KLONER3D printerima, 300H printer odlikuje se najvećom površinom stola za printanje. Specifikacije printera dane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Specifikacije KLONER3D printera [21]

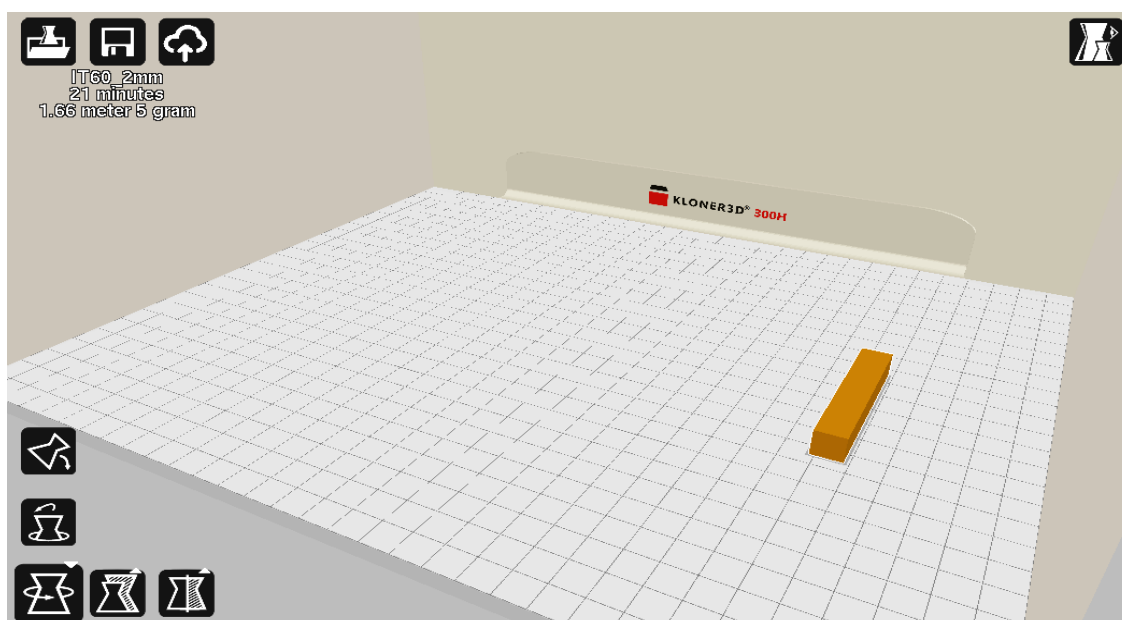
dimenzije printera	400x450x650mm
dimenzije podloge za printanje	320x260x330mm
kretanje ekstrudera	X,Y,Z os
težina printera	25kg
tehnologija printanja	FDM
min. visina sloja	0,1mm
ekstruder	dvostruki
promjer filamenta	1,75mm
promjer brizgalice	0,5mm
materijali	ABS, PLA, PC-ABS, FLEX
softver	KLONER3D - 16.9.29
cijena	~ 4000€

Za korištenje ovoga printera potrebno je koristiti softver KLONER3D – 16.9.29 koji se može skinuti sa stranice proizvođača. Za epruvete korištene u predpokus i pokusu podešeni su parametri prikazani u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Uneseni parametri printanja

visina sloja	0,3mm
debljina konture	1mm
debljina prvog i zadnjeg sloja	1mm
brzina printanja	38mm/s
temperatura materijala	230°C
temperatura stola	110°C
promjer filameta	1,75mm
promjer mlaznice	0,5mm

Sučelje je vrlo jednostavno za korištenje, a parametri se podešavaju prema željenoj kvaliteti proizvoda i željama korisnika. STL datoteka predmeta koji se želi printati se učitava u softver. Predmet se može postaviti bilo gdje na podlogu, rotirati, zrcaliti ili zadati printanje više predmeta odjednom. Kada se parametri postave, predmet se učitava na server koji je povezan bežičnom internet vezom s printerom. Na stranici servera upravlja se svim funkcijama printera, a može se i izravno pratiti tijek printanja predmeta, te pratiti i podešavati temperature materijala i stola za printanje. Na slici 5.2. prikazano je sučelje s predmetom printanja.



Slika 5.2. Sučelje KLONER3D printera

6. PLANOVI POKUSA

Veliki dio istraživanja u znanosti i inženjerstvu, a pogotovo u industriji je empirijsko. Upotreba statističkih metoda planiranja pokusa može znatno povećati učinkovitosti samog procesa eksperimentiranja i dovesti do boljih i pouzdanijih zaključaka. Planiranje pokusa se odnosi na procedure planiranja istraživanja koja se temelje na statističkom ocjenjivanju rezultata ispitivanja, kako bi se, s određenom razinom povjerenja, donosili zaključci o značajkama procesa ili proizvoda. Postoje razne metode planiranja pokusa te se najčešće primjenjuju u istraživanju utjecajnih faktora na karakteristike procesa ili proizvoda. Primjenom neke od procedura planiranja pokusa postižu se velike uštede ljudskih, vremenskih i financijskih resursa. [22]

Vrste planova pokusa:

- 1) Faktorski planovi pokusa - koristi se za ispitivanje veza između više faktora na više razina odjednom.
- 2) Metode odzivnih površina - koristi se za istraživanje veza između više zavisnih i nezavisnih varijabli. Glavna ideja metode je korištenje sekvenci u planiranju pokusa kako bi se postigao optimalni odziv. Ovaj model je samo aproksimacija, ali se često koristi jer je takav model lako procijeniti i upotrijebiti, čak i kada je malo toga poznato o procesu.
- 3) Pokusi sa smjesama (mješavinama). [23]

6.1. Centralno – kompozitni plan pokusa

Prije provedbe istraživanja, potrebno je izabrati odgovarajući plan pokusa s pomoću kojeg je moguće dobiti najveći mogući broj informacija, uz istodobno provođenje najmanjeg broja stanja pokusa, što je u ovom slučaju centralno – kompozitni plan pokusa.

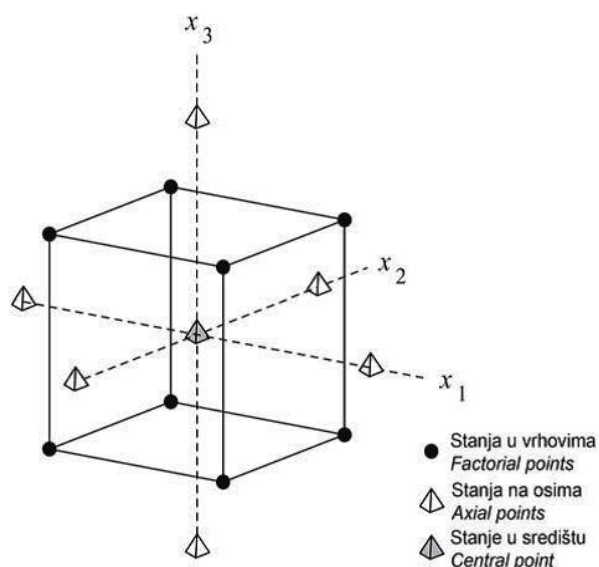
Za potrebe provedbe statističke obrade dobivenih podataka primijenjen je računalni program DesignExpert. Kao rezultat takvog optimiranja očekuje se dobivanje kombinacija različitog postotka ispune uz različite debljine konturi.

Centralno – kompozitni plan pokusa pripada skupini pokusa višeg reda, odnosno metodama odzivne površine. Mjerljiva veličina kvalitete proizvoda je odziv.

Odzivna površina s dovoljnom preciznošću, točnošću i pouzdanošću dopušta predviđanje budućih rezultata u okviru analiziranog područja, te daje uvid u čitav proces.

U praksi se pokazalo kako su najčešće dovoljne funkcije odziva prvog i drugog reda. Polinomske aproksimacije pogodne su posebice stoga što omogućuju lagano izračunavanje koeficijenata polinoma, ali se trebaju smatrati samo aproksimacijom stvarne zakonitosti i to u istraživanom području. [24]

Centralno kompozitni pokus je model pokusa 1. reda (2^k) proširen dodatnim točkama (stanjima pokusa) u centru i točkama u osima kako bi se omogućila procjena parametara modela 2. reda. Centralno kompozitni model pokusa sastoji se od 2^k stanja u vrhovima (faktorska stanja), $2k$ stanja u osima i stanja u centru pokusa (k - broj promatranih faktora). Centralno kompozitni pokus je alternativa $3k$ modelu u izgradnji modela pokusa 2. reda. Pri tome je broj izvođenja (faktorskih stanja) smanjen u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa. Za $k=3$ (faktori su x_1 , x_2 i x_3) prikazan je na slici 6.1. model centralno kompozitnog pokusa za koji je potrebno 15 stanja pokusa. U slučaju potpunog faktorskog plana pokusa bilo bi potrebno 27 stanja pokusa. [24]



Slika 6.1. Centralno – kompozitni plan pokusa s tri faktora [24]

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotatabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ukoliko je zbroj produkata kodiranih stanja bilo koje dvije kolone u matrici pokusa jednaka nuli. [24]

Rotatabilnost centralno kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotatabilnost ovisi o tzv. osnoj udaljenosti α (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa). [24]

Dodatna stanja u centru pokusa služe kako bi se moglo usporediti vrijednosti mjerenja zavisne varijable u centru pokusa s aritmetičkom sredinom za ostatak pokusa. Ukoliko je aritmetička sredina centra pokusa signifikantno različita od ukupne aritmetičke sredine svih ostalih stanja pokusa, tada se može zaključiti da veza između faktora pokusa i zavisne varijable nije linearna. [24]

Ukoliko se pokus barem djelomično ponavlja, moguće je procijeniti grešku pokusa iz varijabilnosti ponovljenih stanja. Kako se ta stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora, procjena greške pokusa iz tih podataka nezavisna je o tome je li model pokusa linearan ili nelinearan, te sadrži li interakcije višeg reda. Tako procijenjena greška pokusa predstavlja čistu grešku, odnosno ona je posljedica samo nepouzdanosti mjerenja zavisne varijable. [24]

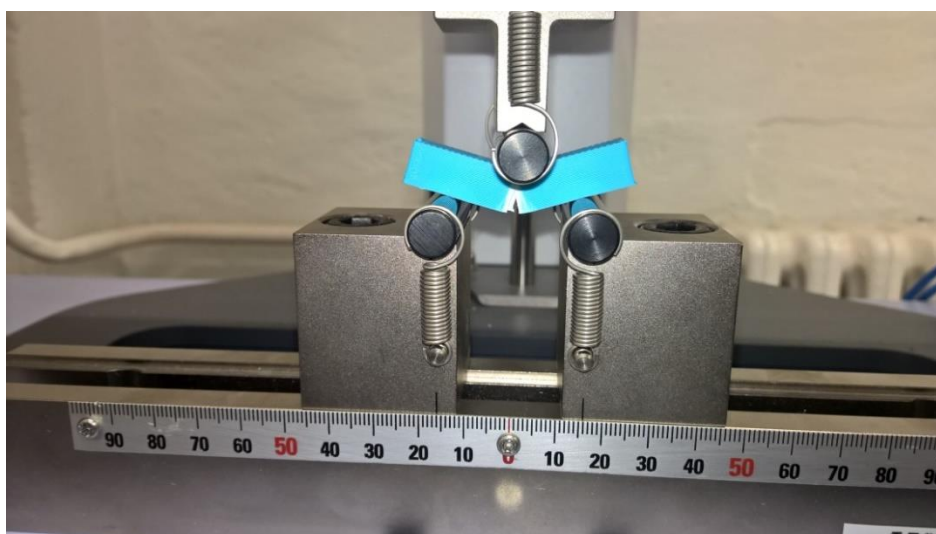
7. SAVOJNA ČVRSTOĆA

Epruvete za ispitivanje mogu biti okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka, a sam oblik i dimenzije epruvete ovise o vrsti materijala koji se ispituje. Za ispitivanje je korištena epruveta kvadratnog poprečnog presjeka, a radi se o tro - točkastom ispitivanju. Ispitivanje se vršilo na kidalici SHIMADZU koja se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.



Slika 7.1. Kidalica na kojoj se vršilo ispitivanje

Epruveta se opterećuje u sredini raspona savojnom silom sve do loma pri prekidnoj sili. Ispitivanje savojne čvrstoće se provodi tako da se epruveta postavi na dva oslonca, koji je svaki promjera 10 mm, te se po sredini epruvete vrši pritisak. Postupak se provodi do konačnog pucanja epruvete.



Slika 7.2. Puknuće epruvete

Pomoću softvera TrapeziumX dobiveni su izlazni rezultati, odnosno savojna čvrstoća svakog ispitanog tijela uz upotrijebljenu silu. Savojna čvrstoća dobivena je prema formuli (1):

$$\sigma_{fM} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

gdje je:

σ_{fM} – savojna čvrstoća, N/mm²

F – ispitno opterećenje, N

L – udaljenost između oslonaca, mm

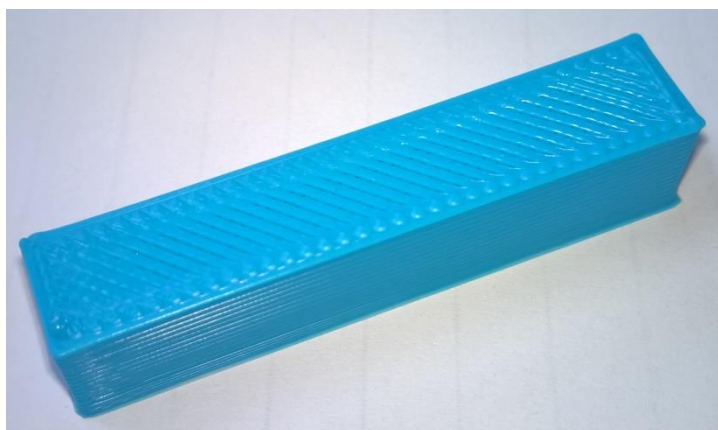
b – širina epruvete, mm

h² – debljina epruvete, mm

8. PREDPOKUS

Predpokusom se željelo utvrditi kako različiti oblici ispune mogu utjecati na mehanička svojstva, vrijeme izrade i masu 3D tiskane tvorevine.

Predpokus je rađen na epruvetama, odnosno ispitnim tijelima čija duljina nije prema normi „HRN_EN_ISO178: 2011: Plastics determination of flexural properties“, jer za potrebe ovoga predpokusa je bilo bitno ispitati kako različiti oblik ispune utječe na mehanička svojstva 3D tiskane tvorevine. Time je ušteden materijal i vrijeme printanja. Za svaku ispunu isprintane su po tri epruvete. Epruvete bi bile rađene po normi ukoliko bi bilo potrebno ispitati i sam utjecaj korištenog materijala na svojstva tiskane tvorevine.



Slika 8.1. Ispitna epruveta

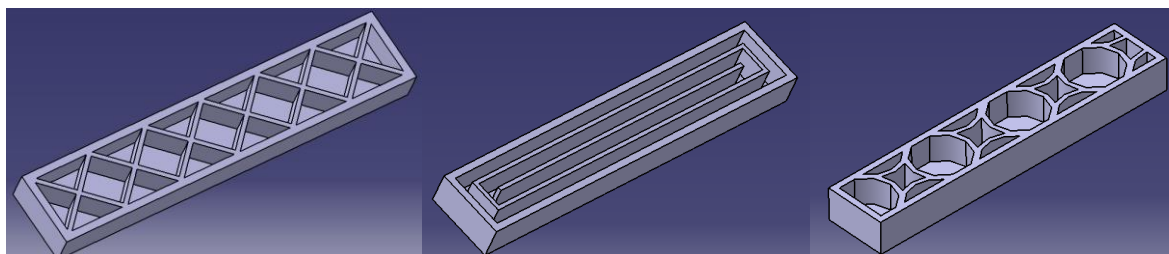
Mjerenje dimenzija epruveta vršilo se pomoću pomičnog mjerila prikazanog na slici 8.2.



Slika 8.3. Pomično mjerilo

Epruvete su ispunjene linijskom, koncentričnom i kružnom ispunom. Navedene ispune opisane su u poglavlju 4.1.

S obzirom da softver KLONER3D – 16.9.29. ne podržava različite vrste ispune, osim linijske, bilo je potrebno ispune izmodelirati kao CAD model, kao što je prikazano na slici 8.3. Tijekom izrade pokušano je preko drugih softvera, kao što je Cura2, koji podržavaju različite vrste ispuna povezati sa KLONER3D printerom, no to nije rezultiralo uspjehom, bez obzira na podešavanje svih parametara.



Slika 8.3. Linijska, koncentrična i kružna ispuna

Razlozi odabira navedenih ispuna za ispitivanje su:

Ispitna epruveta pod brojem 1: linijska ispuna - gotovo ista kao pravocrtna ispuna, ali linijskom ispunom su mehanička svojstva bolja.

Ispitna epruveta pod brojem 2: koncentrična ispuna – rjeđe se primjenjuje, odlikuje se relativno dobrim mehaničkim svojstvima, a kraće je vrijeme izrade od ostalih posebnih ispuna navedenih u poglavlju 4.1.2.4.

Ispitna epruveta pod brojem 3: kružna ispuna - najslićnija ispuni pčelinjih saća, čija su mehanička svojstva vrlo dobra, jer svaki novi sloj naliježe na prethodni, pa je i sama konstrukcija čvršća.

Parametri printanja uneseni u softver KLONER3D - 16.09.29 prikazani su u tablici 8.1.

Tablica 8.1. Parametri printanja za predpokus

broj epruveta	3
dimenzije epruvete	50X10X10 mm
materijal filameta	ABS
promjer filameta	1,75mm
temperatura na kojoj se filament grije	232°C
postotak ispune	50%
širina ispune	0,6mm
debljina stijenke	1mm
visina sloja	0,3mm
prvi i zadnji sloj	1mm
temperatura stola	110°C
brzina printanja	38mm/s
promjer mlaznice	0,5mm

Ispitivanje savojne čvrstoće vršilo se na kidalici SHIMADZU koja se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Parametri koji su podešeni na softveru TrapeziumX prikazani su u tablici 8.2.

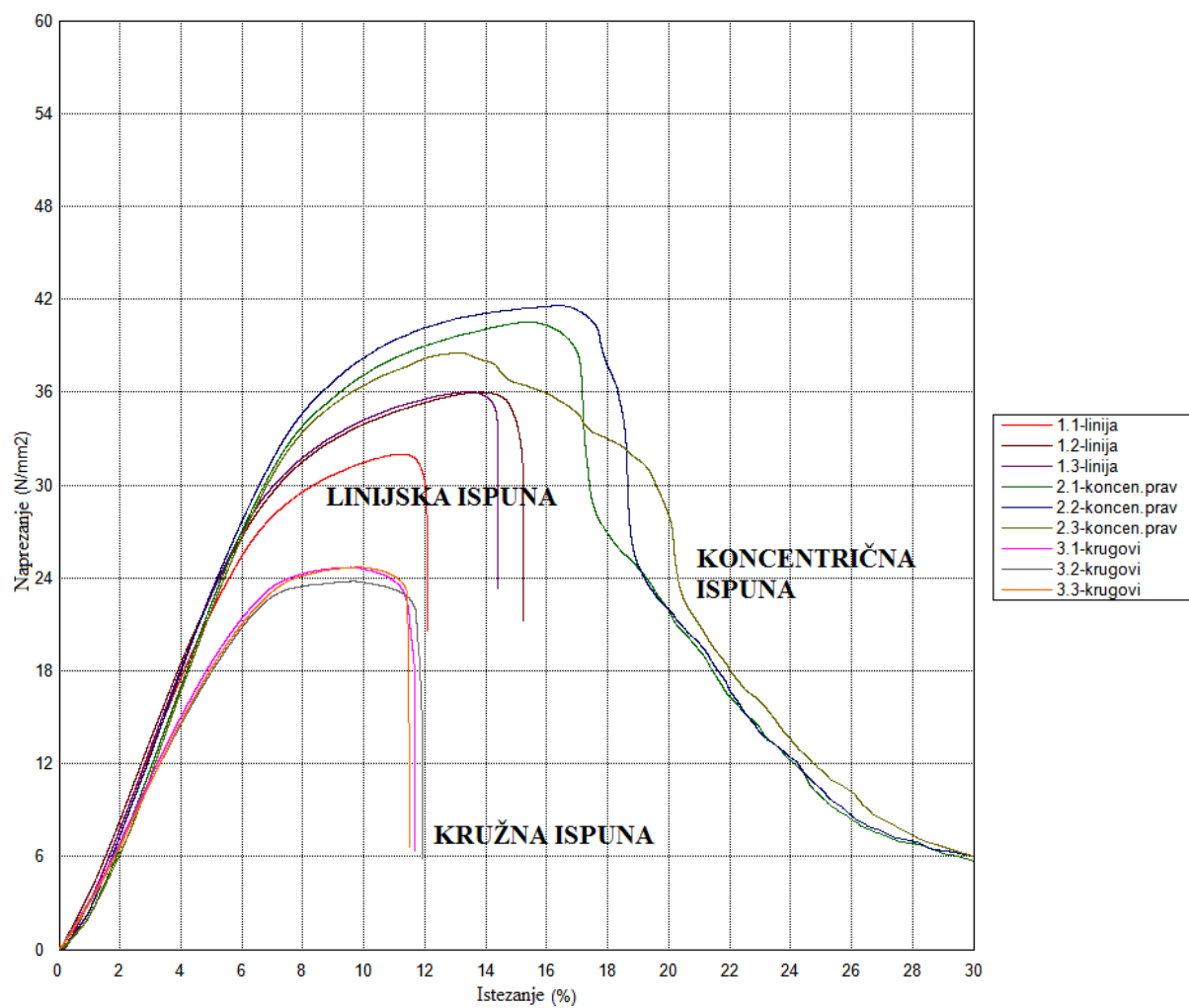
Tablica 8.2. Parametri kidalice

promjer oslonaca	$d = 10\text{mm}$
razmak između oslonaca	$L = 32\text{mm}$
brzina kidanja	$v = 2\text{mm/min}$
temperatura pri kidanju	$t = 22^\circ\text{C}$

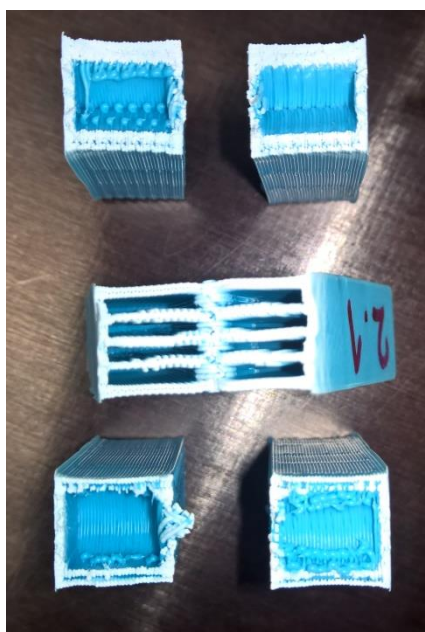
Rezultati mjerenja dani su u Prilogu 1.

Pretpostavljeno vrijeme printanja od strane softvera i stvarno vrijeme printanja bili su približno isti, s obzirom da je brzina printanja bila relativno mala, što je i praćeno na svim ispitnim tijelima.

Rezultati su pokazali da je savojna čvrstoća najveća ukoliko se koristi koncentrična ispuna, što je i prikazano na slici 8.4. Najgori slučaj je kružna ispuna, što je bilo neočekivano, jer je kružna ispuna najslabija ispuna pčelinjih saća koje se odlikuju visokom čvrstoćom. Međutim, u ovom slučaju su ispitivana savojna svojstva pri čemu taj oblik ispune nije pokazao najvišu čvrstoću. Na slici 8.5. prikazana su ispitna tijela nakon ispitivanja na savijanje.



Slika 8.4. Dijagram savojno naprežanje/istezanje za predpokus



Slika 8.5. Prikaz ispitivanih epruveta

9. POKUS

Nakon što je s pomoću predpokusa odabrana odgovarajuća ispuna prema zahtjevu na maksimalnu savojnu čvrstoću, pokusom se želi utvrditi kako će različita gustoća koncentrične ispune i različiti broj kontura utjecati na zadano mehaničko svojstvo uz smanjenje vremena izrade i količine materijala, što bi rezultiralo manjom cijenom izrade. Ispitivale su se epruvete gustoće ispune u intervalu 40 do 60% s konturama od 1 do 2 mm, a različite kombinacije dobivene su pomoću programskog paketa DesignExpert.

Parametri pokusa su isti kao i za predpokus (parametri epruvete, printera, kidalice), osim što je duljina epruvete uvećana za 10mm, a zbog toga se i produljila duljina oslonaca kidalice na 40 mm.

Kao što je navedeno u poglavlju 6., za provedbu pokusa izabran je centralno - kompozitni plan pokusa. Time se dobio najveći mogući broj informacija uz provođenje najmanjeg broja stanja pokusa, te se na taj način uštedjelo na vremenu i korištenom materijalu.

Centralno – kompozitni plan pokusa omogućuje modeliranje polinomom 2. stupnja, te je stoga moguće dobiti prikaz odzivne površine koja se istražuje u odabranim granicama. Primjenom takvog pokusa omogućuje se pronalaženje optimalnih parametara izradbe. Kako bi se dobili podaci potrebni za ispitivanje korišten je program DesignExpert. Tijekom optimiranja određuju se poželjne vrijednosti promatranih parametara, što je u ovome slučaju postotak ispune i debljina konture.

Postavke parametara za DesignExpert su:

- 2 promjenjiva parametra (postotak ispune i debljina konture)
- 3 stanja pokusa u centru
- 3 ponavljanja

Tablica 9.1. Vrijednosti zadanih parametara

Faktor	Naziv	Jedinica	Donja granica	Gornja granica
A	Gustoća ispune	%	40	60
B	Debljina konture	mm	1	2

Provedeni centralno - kompozitni plan pokusa se u ovome slučaju sastojao od 11 stanja pokusa, a izlazni podaci prikazani su u tablici 9.2.

Tablica 9.2. Izlazni podaci za provedbu pokusa

Broj pokusa	Gustoća ispune, %	Debljina konture, mm
1	36	1,5
2	50	1,5
3	60	2
4	65	1,5
5	50	0,8
6	50	2,2
7	50	1,5
8	60	1
9	40	1
10	40	2
11	50	1,5

Na temelju dobivenih podataka izrađene su po tri epruvete za svako stanje pokusa, odnosno izrađene su 33 epruvete dimenzija 60 x 10 x 10 mm.

Tijekom provedbe pokusa usporedila su se i vremena izrade modela u svakom stanju pokusa. Raspolagalo se s tri vrste podataka o vremenu, a to su:

- vrijeme izrade koje je predvidio računalni program za pripremu modela prije izrade (KLONER3D - 16.9.29.)
- vrijeme izrade predviđeno od strane 3D printera nakon učitavanja datoteke
- stvarno vrijeme izrade.

Na temelju usporedbi tih vremena zaključilo se da su vremena približno ista i nema velikih oscilacija između predviđenog i stvarnog vremena izrade. Razlog tome je što se radilo po preporučenoj brzini od strane proizvođača, a ona je iznosila 38 mm/s.

Vremena izrade su bila u intervalu od 22 – 26 min, ovisno o gustoći ispune i širini konture. Rezultati mjerenja prikazani su u prilogu 2.

Za potrebe rada, analiziran je utjecaj izabranih parametara na čvrstoću, vrijeme izrade i masu epruvete. Na dijagramima dobivenim iz programa DesignExpert promatra se utjecaj svakog od pojedinačnih parametara kao i utjecaj njihove interakcije.

U okviru optimiranja podesivih parametara, potrebno je definirati kombinaciju parametara postotka ispune i debljine konture kako bi se postigla prvenstveno što veća čvrstoća ispitnog tijela, a uz to da vrijeme izrade i masa izratka budu u zadovoljavajućoj interakciji.

Prije samog optimiranja analizirani su grafovi ANOVA analizom. ANOVA analiza je u slučaju vremena izrade proizvoda pokazala kako kontura nema signifikantan utjecaj na postizanje što manjeg vremena izrade. Nasuprot tome, debljina ispune utječe na vrijeme izrade, a u međusobnoj interakciji sa najvećom debljinom konture je i najdulje vrijeme izrade.

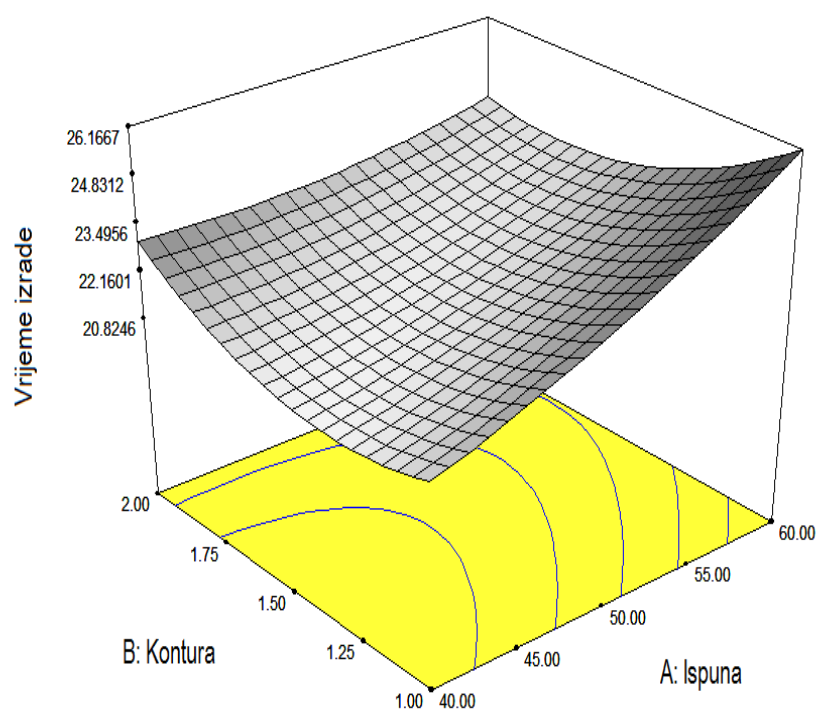
Isto vrijedi i za parametar mase proizvoda.

Pri analizi parametra savojne čvrstoće najveći utjecaj ima gustoća konture, a debljina konture se može uzeti za najmanju debljinu, jer nema značajnog utjecaja na navedene parametre. Na slikama 9.1., 9.2. i 9.3. prikazani su grafovi dobiveni ANOVA analizom.

VRIJEME IZRADE

X = A: Ispuna

Y = B: Kontura

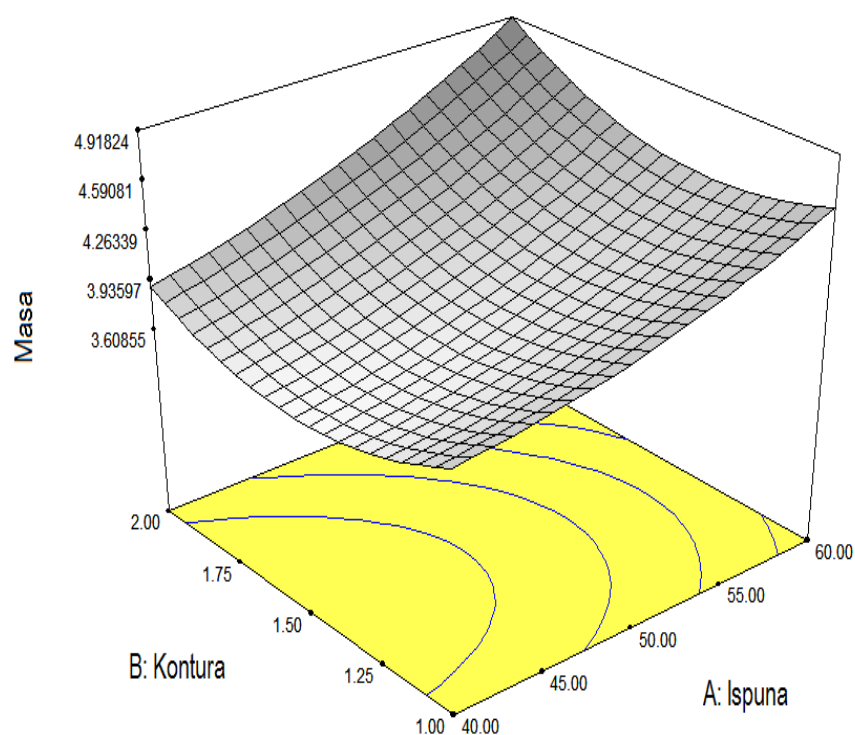


Slika 9.1. Utjecaj na vrijeme izrade ispitnog tijela

MASA

X = A: Ispuna

Y = B: Kontura

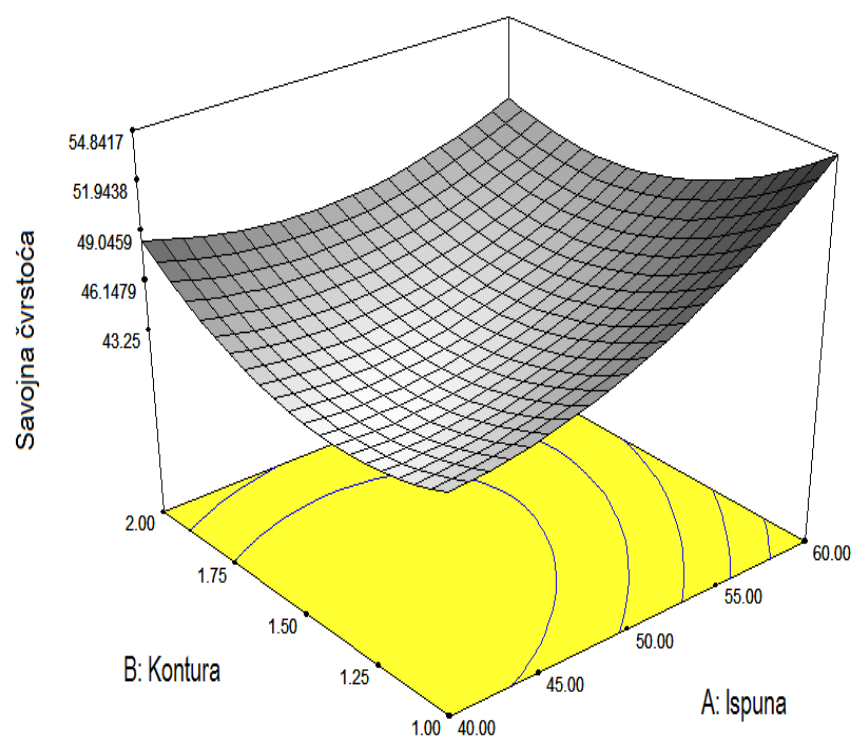


Slika 9.2. Utjecaj na masu ispitnog tijela

SAVOJNA ČVRSTOĆA

X = A: Ispuna

Y = B: Kontura



Slika 9.3. Utjecaj na savojnu čvrstoću ispitnog tijela

Podaci iz priloga 2 uneseni su u programski paket DesignExpert te je slijedilo optimiranje. Prvo optimiranje vršilo se kao jednostavno optimiranje prema savojnoj čvrstoći. Kao kriterij postavljena je maksimalno moguća dobivena savojna čvrstoća uz interval gustoće ispune i debljine konture koji su definirani prethodno, a masa i vrijeme nisu uzeti u obzir kao željeni, odnosno definirani kriterij.

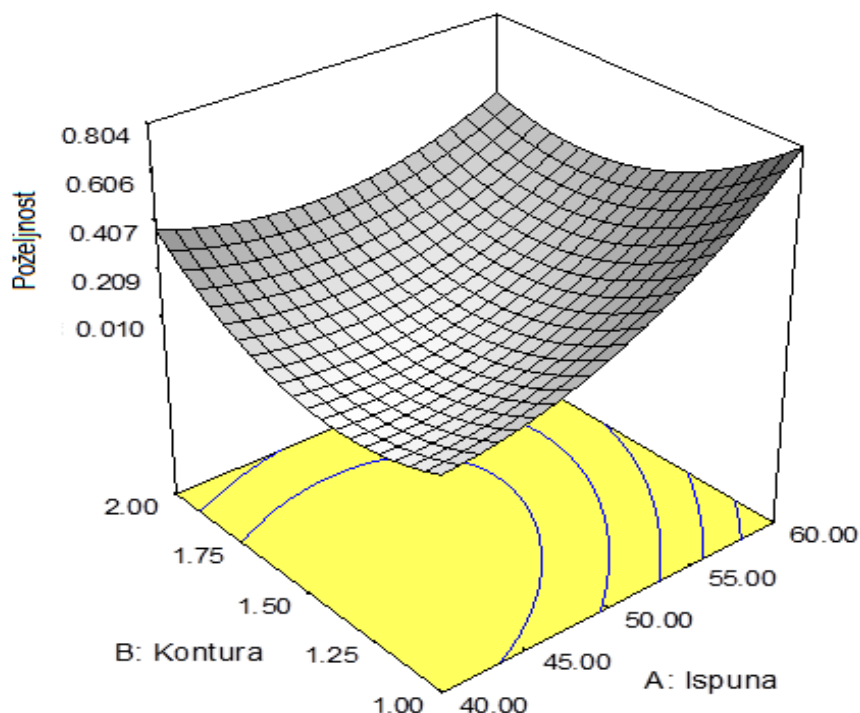
Kao rezultat navedenih kriterija dobiveno je rješenje sa 60% ispune uz debljinu konture 1 mm, što je i prikazano na tablici 9.3 i slici 9.4. koje su dobivene u programskom paketu DesignExpert.

Tablica 9.3. Prikaz rješenja uz unesene kriterije za jednostavno optimiranje

Naziv	Kriterij	Donja granica	Gornja granica
Ispuna	u intervalu	40	60
Kontura	u intervalu	1	2
Savojna čvrstoća	maksimalna	43,1	57,7

Broj rješenja	Ispuna	Kontura	Savojna čvrstoća	Poželjnost
1	60,00	1,00	54,8417	0,80422719
2	60,00	2,00	49,9567	0,46963501

X = A: Ispuna
Y = B: Kontura

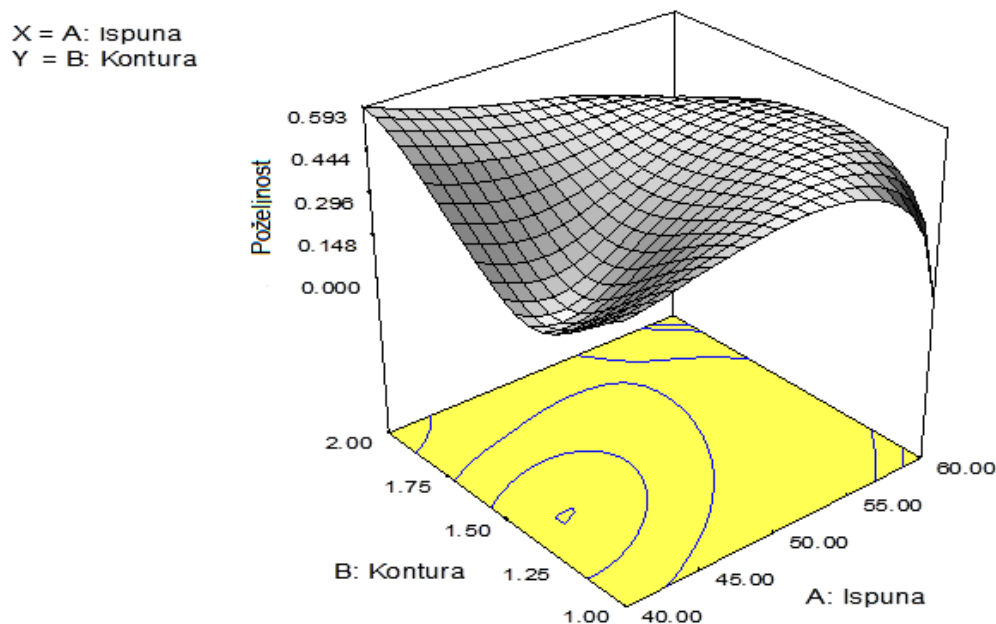


Slika 9.4. Graf ovisnosti funkcije poželjnosti (savojna čvrstoća) o konturi i ispuni

Drugo optimiranje je kompleksno optimiranje parametara uz maksimalnu čvrstoću i minimalno vrijeme izrade s minimalnom masom izratka, što je kontradiktorno, ali je uzeto kao pokazno, kako bi se time usporedili rezultati dobiveni s traženom maksimalnom savojnom čvrstoćom ispitnog tijela. Kako bi se udovoljilo ovim kriterijima gustoća ispune mora biti 40%, a debljina konture 2mm, kao što je i prikazano u tablici 9.4. i slici 9.5. dobivenim u programskom paketu DesignExpert.

Tablica 9.4. Prikaz rješenja uz unesene kriterije za jednostavno optimiranje

Naziv	Kriterij	Donja granica	Gornja granica			
Ispuna	u intervalu	40	60			
Kontura	u intervalu	1	2			
Masa	minimalna	3,84	4,82			
Savojna čvrstoća	maksimalna	43,1	57,7			
Vrijeme izrade	minimalno	22	26			
Broj rješenja	Ispuna	Kontura	Masa	Savojna čvrstoća	Vrijeme izrade	Poželjnost
1	40,00	2,00	3,90068	48,5779	23,0286	0,593
2	52,50	1,05	4,17533	48,2924	23,6944	0,487



Slika 9.5. Graf ovisnosti funkcije poželjnosti (kompleksna funkcija) o ispuni i konturi pri kompleksnom optimiranju

Prema očekivanjima, pokazalo se da ispuna ima značajni utjecaj na savojnu čvrstoću i vrijeme izrade od konture. Odabrana je epruveta sa 60% ispune debljine konture 1 mm. Što je kontura tanja, ispuna više dolazi do izražaja, jer je preostali prostor za ispunu veći i potrebno je više vremena za izradu epruvete.

ZAKLJUČAK

Taložno očvršćivanje (FDM) kao aditivni postupak ima sve rašireniju primjenu, kako u industrijskom svijetu, tako i u pojedinačnoj primjeni korisnika. Tvorevine načinjene postupcima FDM su izdržljive i idealne za izradu konceptnih modela, inženjerskih modela, proizvodnje alata i funkcionalnih prototipova. Razvitkom niskobudžetnih 3D printera koji rade na postupku taložnog očvršćivanja, kao i same dostupnosti zbog svoje cijene, sve je veća primjena kod korisnika koji žele izrađivati proizvode prema svojim željama i potrebama. Primjenom FDM postupka točnost tvorevina je dobra, a materijal koji se primjenjuje relativno je jeftin.

Vrlo je važno znati kako će se model koristiti nakon izrade, odnosno pod kakvim će opterećenjima biti i pri kojim temperaturama će se odvijati njegova eksploatacija. Proces proizvodnje je slojevit, zbog toga je vrlo važno odabrati pravilnu orijentaciju modela tijekom izrade. To je najbitniji dio pripreme CAD modela za izradu ovom tehnologijom, jer pravilan raspored sila osigurava model od pucanja tokom uporabe. Ako se model neće koristiti pod opterećenjem, orijentacija modela nije bitna.

U ovome radu težište je bilo na ispitivanju utjecaja gustoće ispune i debljine konture na savojnu čvrstoću ispitnih tijela.

Kao što je bilo očekivano, debljina konture nije imala značajnijeg utjecaja u odnosu na gustoću ispune. Pri ispitivanju uzoraka na savojno opterećenje došlo se do zaključka da dominantan utjecaj na čvrstoću 3D tiskane tvorevine ima gustoća ispune. Analizom savojne čvrstoće na ispunama gustoće 35 - 65% ustavljeno je da je promjena čvrstoće u rasponu od 15 N/mm^2 , što daje za rezultat da nema značajnih promjena i odstupanja.

Postavlja se pitanje kada koristiti koju gustoću ispune. Bitan faktor je način i iznos opterećenja. Bitno je prije samog korištenja određene gustoće ispune odlučiti da li će referenca biti čvrstoća, vrijeme izrade ili masa izratka. U slučaju ako postoje složenija opterećenja poželjno je sa strane sigurnosti koristiti ispune većeg postotka gustoće i čvrstoće, a ne uzimati u obzir vrijeme izrade. Međutim, u slučaju ako su opterećenja relativno jednostavna i ako je potrebnu čvrstoću 3D tiskane tvorevine moguće odrediti prema samoj uporabi proizvoda, tada se može koristiti ispuna manjeg postotka gustoće. Sa manjim zahtjevima na čvrstoću moguće je koristiti ispune manje gustoće, koji će rezultirati kraćom izradom i manjom masom predmeta.

Ukoliko je najbitniji faktor čvrstoća, tada se bira 60% ispune sa debljinom kontura 1mm, a ukoliko je bitnija interakcija vremena izrade i mase izratka, uz relativno zadovoljavajuću savojnu čvrstoću, tada će se izabrati ispuna vrijednosti 40% uz debljinu konture 2 mm.

POPIS LITERATURE

- [1] Doc. dr. sc. Damir Godec, prof. dr. sc. Mladen Šercer, Aditivna proizvodnja za mala i srednja poduzeća, FSB, podloge s predavanja, Zagreb, 2016
- [2] Doc. dr. sc. Damir Godec, prof. dr. sc. Mladen Šercer: Aditivna proizvodnja, Zgreb, 2015.
- [3] <https://blog.prototypr.io/what-the-hell-is-rapid-prototyping-fe101e446a78>, pristup 4.7.2017.
- [4] <https://www.slideshare.net/SachinHariprasad/rapid-tooling-rt>, pristup 4.7.2017
- [5] <https://repozitorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A122>, pristup 5.7.2017.
- [6] <https://repozitorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A95>, pristup 5.7.2017.
- [7] http://hrcak.srce.hr/search/?show=results&c%5B0%5D=article_search&t%5B0%5D=fdm&s=score&st=desc&r=10&fak%5B0%5D=3D+FMD+printing&fak%5B1%5D=3D+FDM+printanje, pristup 4.7.2017.
- [8] Doc. dr. sc. Damir Godec, prof. dr. sc. Mladen Šercer, Aditivna proizvodnja tvorevina, FSB, podloge s predavanja, 2016
- [9] <https://dr.nsk.hr/islandora/object/vuka%3A399/datastream/PDF/view>, pristup 5.7.2017.
- [10] <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>, pristup 12.9.2017.
- [11] <https://cheap3dfilaments.com>, pristup 12.9.2017.
- [12] Doc. dr. sc. Damir Godec, Additive Manufacturing for polymer processing, FDM, podloge s predavanja, 2017.
- [13] <http://support.solidoodle.com/hc/en-us/articles/201295134-Infill>, pristup 5.7.2017.
- [14] <http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/FDM%20Test%20Reports/Mechanical%20Properties%20of%20Utem%20FDM%20Parts.pdf>, MECHANICAL PROPERTIES OF FUSED DEPOSITION MODELING PARTS MANUFACTURED WITH ULTEM*9085, ANTEC 2011, Boston
- [15] <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>, pristup 5.7.2017.
- [16] <https://www.quora.com/Why-do-3D-printers-use-a-honeycomb-structure-to-print-out-objects>, pristup 8.11.2017.
- [17] <https://www.makerbot.com>, pristup 5.7.2017.
- [18] <https://engineerdog.com/2015/03/08/3d-printing-a-3d-honeycomb-infill-concept/>, pristup 8.11.2017.
- [19] Eragubi, M., Slicing 3D CAD Model in STL Format and Laser Path Generation, International Journal of Innovation, 4(4), 2013, pp. 410-413., pristup 13.9.2017.
- [20] http://downloads.makerbot.com/replicator2x/MakerBot_Replicator2X_UserManual_Eng.pdf, pristup 8.11.2017.

- [21] <http://www.kloner3d.com/kloner3d300h-en.html> , pristup 25.11.2017.
- [22] http://repozitorij.fsb.hr/2808/1/09_07_2014_Diplomski_rad_Marko_Topalusic.pdf, pristup 25.11.2017
- [23] [https://www.fsb.unizg.hr/atlas/web/sites/poslijediplomski_studij/content/materijali/Ne deljko%20Stefanic_2014_PLANOV%20POKUSA%20OBJEDINJENO.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlas/web/sites/poslijediplomski_studij/content/materijali/Ne%20deljko%20Stefanic_2014_PLANOV%20POKUSA%20OBJEDINJENO.pdf), pristup 17.11.2017.
- [24] http://repozitorij.fsb.hr/9/1/20_01_2006_Godec_doktorat.pdf , pristup 6.7.2017.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Prilog 1., Prilog 2.

Prilog 1. Tablica rezultata ispitivanja epruveta za predpokus

BROJ POKUSA	ISPUNA	VRIJEME PRINTANJA, min	MJERENI PODACI	EPRUVETA 1	\bar{X}_1	EPRUVETA 2	\bar{X}_2	EPRUVETA 3	\bar{X}_3	\bar{X}
1	LINIJSKA 50%	18 min	DEBLJINA h , mm	9,87	9,88	9,89	9,86	9,95	9,87	
				9,92		9,87		9,91		
				9,84		9,82		9,75		
			ŠIRINA b , mm	10,09	10,22	10,38	10,41	10,08	10,07	
				10,22		10,11		9,99		
				10,34		10,75		10,14		
			DULJINA l , mm	49,22		49,58		49,26		
			MASA m , g	2,9		2,93		2,86		
			SAVOJNA ČVRTOĆA σ_{fM} , N/mm ²	31,99		35,97		36,67		
			2	KONCENTRIČNA 50%	17 min	DEBLJINA h , mm	9,7	9,79	9,78	
9,73	9,74	9,79								
9,93	9,76	9,84								
ŠIRINA b , mm	10,06	10,08				10,11	10,04	10,08	10,06	
	10,05					9,99		10,03		
	10,14					10,03		10,06		
DULJINA l , mm	49,19					49,42		49,15		
MASA m , g	2,89					2,88		2,86		
SAVOJNA ČVRTOĆA σ_{fM} , N/mm ²	40,54					41,57		38,52		40,21
3	KRUŽNA 50%	16 min				DEBLJINA h , mm	9,84	9,89	9,73	9,89
			9,88	10,02	9,93					
			9,95	9,9	9,88					
			ŠIRINA b , mm	10,04	9,98	10,38	10,2	9,97	9,99	
				9,97		10,22		10,02		
				9,94		10,02		10		
			DULJINA l , mm	49,29		49,32		49,32		
			MASA m , g	2,55		2,55		2,53		
			SAVOJNA ČVRTOĆA σ_{fM} , N/mm ²	24,68		23,78		24,69		24,38

Prilog 2. Tablica rezultata ispitivanja epruveta za pokus

BROJ POKUSA	UDIO ISPUNE %	ŠIRINA KONTURE mm	VRIJEME PRINTANJA, min	MJERENI PODACI	EPRUVETA 1	\bar{X}_1	EPRUVETA 2	\bar{X}_2	EPRUVETA 3	\bar{X}_3	\bar{X}
1	36%	1,5 mm	24 min	DEBLJINA h , mm	9,88	9,86	9,87	9,87	9,92	9,87	9,87
					9,86		9,86		9,9		
					9,83		9,93		9,79		
				ŠIRINA b , mm	10,11	10,09	10,13	10,09	10,11	10,13	10,1
					10,08		10,08		10,1		
					10,07		10,06		10,19		
				DULJINA l , mm	59,58		59,45		59,52		59,52
				MASA m , g	4,39		4,41		4,41		4,4
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	45,9116		47,4627		46,797		46,7
2	50%	1,5 mm	22 min	DEBLJINA h , mm	9,73	9,8	9,76	9,82	9,72	9,82	9,81
					9,87		9,82		9,81		
					9,81		9,88		9,92		
				ŠIRINA b , mm	10,18	10,04	10,01	10,08	10,11	10,13	10,08
					9,98		10,03		10,35		
					9,97		10,21		9,92		
				DULJINA l , mm	59,43		59,44		59,46		59,44
				MASA m , g	3,93		3,95		3,89		3,92
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	45,7057		45,7474		45,0356		45,5
3	60%	2 mm	22 min	DEBLJINA h , mm	9,82	9,79	9,84	9,84	9,8	9,72	9,78
					9,8		9,84		9,71		
					9,76		9,83		9,64		
				ŠIRINA b , mm	10,09	10,13	9,9	10,1	9,86	9,88	10,04
					10,26		10,18		9,9		
					10,04		10,21		9,88		
				DULJINA l , mm	59,21		59,52		59,12		59,88
				MASA m , g	3,85		3,81		3,8		3,82
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	44,5503		43,5849		45,3865		44,5

1. nastavak tablice rezultata ispitivanja epruveta za pokus

BROJ POKUSA	UDIO ISPUNE %	ŠIRINA KONTURE mm	VRIJEME PRINTANJA, min	MJERENI PODACI	EPRUVETA 1	\bar{X}_1	EPRUVETA 2	\bar{X}_2	EPRUVETA 3	\bar{X}_3	\bar{X}
4	65%	1,5 mm	26 min	DEBLJINA h , mm	9,84	9,84	9,78	9,79	9,79	9,8	9,81
					9,85		9,83		9,86		
					9,84		9,76		9,76		
				ŠIRINA b , mm	10,06	10,04	10,05	10,02	10,16	10,06	10,04
					10,02		9,97		9,99		
					10,05		10,03		10,03		
				DULJINA l , mm	59,76		59,31		59,51		59,53
				MASA m , g	4,83		4,8		4,75		4,79
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	57,8587		59,0942		56,127		57,7
5	50%	0,8 mm	24 min	DEBLJINA h , mm	9,82	9,84	9,83	9,85	9,86	9,87	9,85
					9,87		9,89		9,88		
					9,84		9,84		9,86		
				ŠIRINA b , mm	10,16	10,18	10,24	10,21	10,19	10,25	10,21
					10,14		10,16		10,28		
					10,25		10,24		10,28		
				DULJINA l , mm	59,42		59,18		59,31		59,3
				MASA m , g	4,33		4,33		4,41		4,36
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	51,2217		51,6805		51,2876		51,4
6	50%	2,2 mm	26 min	DEBLJINA h , mm	9,85	9,84	9,9	9,92	9,83	9,83	9,86
					9,84		9,99		9,87		
					9,84		9,86		9,8		
				ŠIRINA b , mm	9,99	9,99	10,05	10,21	10,23	10,09	10,1
					9,96		10,38		10		
					10,01		10,2		10,03		
				DULJINA l , mm	59,46		59,69		59,67		59,61
				MASA m , g	4,67		4,8		4,72		4,73
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	53,9534		54,1029		54,4044		54,2

2. nastavak tablice rezultata ispitivanja epruveta za pokus

BROJ POKUSA	UDIO ISPUNE %	ŠIRINA KONTURE mm	VRIJEME PRINTANJA, min	MJERENI PODACI	EPRUVETA 1	\bar{X}_1	EPRUVETA 2	\bar{X}_2	EPRUVETA 3	\bar{X}_3	\bar{X}
7	50%	1,5 mm	22 min	DEBLJINA h , mm	9,9	9,89	9,94	9,93	9,95	9,93	9,92
					9,89		9,94		9,93		
					9,89		9,91		9,91		
				ŠIRINA b , mm	9,86	9,96	10,01	9,96	10,29	10,22	10,05
					10,07		9,91		10,22		
					9,95		9,96		10,14		
				DULJINA l , mm	59,55		59,56		59,4		59,5
				MASA m , g	3,88		3,9		3,91		3,9
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	43,2287		43,8261		42,3019		43,1
8	60%	1 mm	26 min	DEBLJINA h , mm	9,89	9,88	9,87	9,86	9,9	9,89	9,88
					9,88		9,88		9,92		
					9,88		9,84		9,86		
				ŠIRINA b , mm	10,13	10,07	9,9	10,02	10,24	10,22	10,1
					10,06		10,04		10,21		
					10,03		10,11		10,22		
				DULJINA l , mm	59,78		59,41		59,38		59,5
				MASA m , g	4,59		4,61		4,56		4,59
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	51,416		52,729		51,5556		51,9
9	40%	1 mm	22 min	DEBLJINA h , mm	9,86	9,87	9,86	9,84	9,81	9,79	9,83
					9,87		9,83		9,8		
					9,87		9,84		9,76		
				ŠIRINA b , mm	9,96	9,95	9,91	9,97	9,85	9,9	9,94
					9,95		10,08		9,94		
					9,94		9,92		9,91		
				DULJINA l , mm	59,68		59,6		59,25		59,51
				MASA m , g	4,03		3,97		3,91		3,97
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	44,882		46,3765		44,5736		45,3

3. nastavak tablice rezultata ispitivanja epruveta za pokus

BROJ POKUSA	UDIO ISPUNE %	ŠIRINA KONTURE mm	VRIJEME PRINTANJA, min	MJERENI PODACI	EPRUVETA 1	\bar{X}_1	EPRUVETA 2	\bar{X}_2	EPRUVETA 3	\bar{X}_3	\bar{X}
10	40%	2 mm	22 min	DEBLJINA h , mm	9,82	9,83	9,84	9,86	9,81	9,83	9,84
					9,84		9,89		9,86		
					9,82		9,85		9,82		
				ŠIRINA b , mm	10,13	10,02	10,14	10,17	10,05	10,01	10,07
					10,03		10,17		10,04		
					9,91		10,19		9,93		
				DULJINA l , mm	59,56		59,49		59,39		59,48
				MASA m , g	3,85		3,91		3,76		3,84
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	46,7491		46,5549		46,5284		46,6
11	50%	1,5 mm	22 min	DEBLJINA h , mm	9,94	9,93	9,89	9,89	9,89	9,9	9,91
					9,92		9,9		9,91		
					9,92		9,89		9,9		
				ŠIRINA b , mm	9,97	9,95	9,98	9,94	10,01	9,99	9,96
					9,93		9,91		10,01		
					9,95		9,94		9,94		
				DULJINA l , mm	59,7		59,35		59,45		59,5
				MASA m , g	3,92		3,84		3,89		3,88
				SAVOJNA ČVRSTOĆA $\sigma_f M$, N/mm ²	45,278		43,6416		44,2306		44,4